

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE EDUCACIÓN

Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales



**LA ÓPTICA EN LA ENSEÑANZA SECUNDARIA:
PROPUESTA DIDÁCTICA DESDE UNA PERSPECTIVA
HISTÓRICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Javier Sotres Díaz

Bajo la dirección del doctor
Antonio Moreno González

Madrid, 2009

• ISBN: 978-84-692-1119-9

© Javier Sotres Díaz, 2008

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE EDUCACION
CENTRO DE FORMACIÓN DEL PROFESORADO
DEPARTAMENTO DE DIDÁCTICA DE LAS CIENCIAS
EXPERIMENTALES



LA ÓPTICA EN LA ENSEÑANZA SECUNDARIA:
PROPUESTA PARA SU DIDÁCTICA DESDE UNA
PERSPECTIVA HISTÓRICA

TESIS DOCTORAL

Presentada por
FRANCISCO JAVIER SOTRES DIAZ
Para optar al grado de Doctor

Dirigida por el Doctor
ANTONIO MORENO GONZÁLEZ
Catedrático de la Universidad Complutense

Madrid, 2008

AGRADECIMIENTOS

Cuando inicié esta andadura, hace ya cuatro años, tenía el proyecto de crear una referencia sólida de los paradigmas de la óptica y de su didáctica en la enseñanza secundaria de nuestro país, poniendo un énfasis especial en la historia de las ideas, que fuera también útil para estudiantes universitarios ávidos de iniciarse en una cultura científica básica. Como en la historia de Ulises, el camino fue largo, unas veces tedioso y otras excitante, mas siempre apoyado por la certeza de que el objetivo merecía la pena.

Al final del trayecto, pertrechadas mis alforjas de recuerdos científicos rescatados del olvido y puestos a disposición de las nuevas generaciones de nuestro país para su provecho, encontré la puerta de caminos antiguos que invitan a compartir la aventura del conocimiento con todos aquéllos que sientan que consultar las fuentes y revivir las experiencias originales, es siempre necesario para sentir en su totalidad el fenómeno físico.

Es ya el momento de deshacerse de las gemas que salieron a la luz, buscar otras, y de agradecer a todos los que ayudaron a la empresa. Gracias pues a:

- Manuela Martín y Antonio Moreno, del Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Facultad de Educación de la Universidad Complutense, responsables directos del inicio y seguimiento del proyecto, a quienes debo asesorías didáctica e histórica, cordialidad y calor humano.
- Javier Alda y Agustín González, profesores de la Escuela Universitaria de Óptica de la misma Universidad, que me orientaron al comienzo del proyecto.
- Mis compañeros y sus alumnos de los IES Gregorio Marañón, Alcal'a Nahar, San Juan Bautista, Castilla y Alpedrete por su ayuda y diligencia en la formalización de los cuestionarios, el elemento más vivo de la investigación.
- Antonio González, el secretario administrativo del Departamento, que con su ayuda en temas informáticos, contribuyó en gran medida a que la presentación de la Unidad Didáctica tuviera un cierto decoro.
- Mis lazos familiares, Kika, Herminia y Javier.

En Madrid, abril de 2008

ÍNDICE

PÁGINA

AGRADECIMIENTOS

INTRODUCCION	1
--------------------	---

1. MARCO TEÓRICO

1.1. EPISTEMOLOGÍAS DE LA CIENCIA	5
1.2 CONSTRUCTIVISMO EN EL APRENDIZAJE	11
1.3 LA OLA DE LOS PROYECTOS EDUCATIVOS DE CIENCIAS	15
1.4. EL EXPERIMENTO EN LA CIENCIA Y EN SU ENSEÑANZA	18
1.5 EL EXPERIMENTUM CRUCIS EN LA ENSEÑANZA.....	21
1.6 LOS PRECEDENTES EN LA ENSEÑANZA DE LA HISTORIA DE LAS CIENCIAS	23
1.7 LOS PRECEDENTES EN LA ENSEÑANZA DE LA ÓPTICA.....	31
1.8 EL MODELO ESCOGIDO	43

2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 ENUNCIADO DEL PROBLEMA	47
2.2 SECUENCIA DE LAS ACCIONES DE LA INVESTIGACIÓN	48
2.3 ELECCIÓN DEL MODELO PARA LAS ACCIONES DIDÁCTICAS	50
2.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA.....	52
2.5 LOS MATERIALES DEL ANÁLISIS	53

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. EL CONTEXTO LEGISLATIVO.....	55
3.2 EL CONTEXTO DE LAS EDITORIALES	56
3.3 EXPERIENCIAS DE OTROS PROFESORES	62
3.4 LOS ALUMNOS ANTES DEL PROCESO	73
3.5 INVESTIGACIONES COMPLEMENTARIAS SOBRE PRECONCEPTOS ÓPTICOS..	101
3.6 LOS ALUMNOS DESPUÉS DEL PROCESO	117

3.7	ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE LA UNIDAD DIDÁCTICA	
3.7.1	LOS OBJETIVOS.....	119
3.7.2	LOS CONTENIDOS.....	119
3.7.3	LA METODOLOGÍA.....	121
3.7.4	LOS RECURSOS	122
3.7.5	EL LENGUAJE Y EL ESTILO DE LA UNIDAD.....	123
3.7.6	EL DESARROLLO DE LA UNIDAD.....	124
3.7.7	LA EVALUACIÓN	129
3.8	LA SECUENCIA DE LA ACCIÓN	130
3.9	ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE LAS LECTURAS DE ÓPTICA.	
3.9.1	LOS OBJETIVOS.....	132
3.9.2	LA SECUENCIACIÓN.....	133
3.9.3	LAS FUENTES ACADÉMICAS E HISTÓRICAS.....	134
3.10	EL TRABAJO INDIVIDUAL.....	134
3.11	CONSIDERACIONES FINALES	135
	BIBLIOGRAFIA.....	137
	ANEXOS	
	ANEXO I : ENCUESTAS DE ALUMNOS PREVIAS A LA ACCIÓN DIDÁCTICA	156
	ANEXO II : ENCUESTAS DE ALUMNOS POSTERIORES A LA ACCIÓN DIDÁCTICA.....	165
	ANEXO III: ENCUESTAS A PROFESORES	169
	ANEXO IV :TRABAJO INDIVIDUAL.....	171
	ANEXO V : LAS LECTURAS HISTÓRICAS.	
5.1.	LA MIRADA DEL BASILISCO	
5.1.1	EL MUNDO CLÁSICO	175
	LA TEORÍA EXTROMISIVA.....	177
	LA TEORÍA INTROMISIVA.....	180
	LA ESCUELA FISIOLÓGICA.....	185
5.1.2	LA ÓPTICA ÁRABE	186
5.1.3	LA ÓPTICA EN LA ALTA EDAD MEDIA	196
5.1.4	LOS PERSPECTIVISTAS MEDIEVALES	199
5.1.5	EL QUATROCCENTO ITALIANO	203
5.1.6	LA ÓPTICA EN EL RENACIMIENTO	206
5.1.7	LA ANATOMÍA OCULAR.....	219
5.1.8	LA NUEVA ÓPTICA.....	211
5.2	LOS PARADIGMAS ÓPTICOS DE LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA	
5.2.1	LOS PROLEGÓMENOS.....	223
5.2.2	LA HISTORIA DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN	227
5.2.3	LOS EXPERIMENTUM CRUCIS.....	246
5.2.4	LA TEORÍA CORPUSCULAR DE OPTICKS.....	256
5.2.5	LA TEORÍA DE LOS MEDIOS.....	294
5.2.6	REPERCUSIONES EUROPEAS DE AMBAS TEORÍAS.....	299

5.3 LA ECLOSIÓN DE LA TEORÍA DE LOS MEDIOS

5.3.4 LAS INTERFERENCIAS LUMINOSAS

LOS HETERODOXOS	305
EL ÚLTIMO SABIO UNIVERSAL	309
EL PRINCIPIO DE INTERFERENCIA	310
EL PRINCIPIO APLICADO A LA LUZ	313
LAS LÁMINAS DELGADAS	315
EL ARCOIRIS SUPERNUMERARIO	317
LA DIFRACCIÓN DE LA LUZ POR UN CABELLO	318
LA DOBLE RENDIJA	320
LA CONDICIÓN DE COHERENCIA	323
EL PRINCIPIO DE INTERFERENCIA EN SU ÉPOCA	325

5.3.2 LA DIFRACCIÓN DE AUGUSTIN FRESNEL

EFEMÉRIDES DE FRESNEL	328
EL FIN DE LOS "FITS"	329
LAS LÁMINAS DELGADAS	330
INTERFERENCIA CON PRISMAS	332
LAS LÁMINAS PARALELAS	334
LA DIFRACCIÓN A TRAVÉS DE CUERPOS ESTRECHOS	335
LA COHERENCIA ESPACIAL DESCIFRADA AL FIN	336
LOS ESPEJOS DE FRESNEL	337
EL PRINCIPIO DE HUYGENS- FRESNEL	338
EL ALGORITMO DE FRESNEL DEL VECTOR GIRATORIO	339
LAS ZONAS DE FRESNEL	341
LAS LENTES ZONALES DE FRESNEL	344
APLICACIÓN A UN AGUJERO CIRCULAR	346
OBSTÁCULO CIRCULAR	347
DIFRACCIÓN DE FRAUNHOFER POR UNA RENDIJA	348
TRATAMIENTO COMPLETO DE LA DOBLE RENDIJA	351

5.3.3 LA POLARIZACIÓN DE LA LUZ

LOS INICIOS	353
LA REFLEXIÓN POLARIZADA	357
LA POLARIZACIÓN ESPECULAR A LA LUZ DE LAS ONDASTRANSVERSALES	360
OTRAS FORMAS DE POLARIZACIÓN	362
LA INTUICIÓN DE LAS ONDAS TRANSVERSALES	362
RELACIONES ENTRE MAS Y POLARIZACIÓN	367
POLARIZACIÓN LINEAL	368
POLARIZACIÓN CIRCULAR	369
POLARIZADORES Y ANALIZADORES	370
COLORES POR LÁMINAS BIRREFRINGENTES	371

5.3.4 LA SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

PRECEDENTES DE FARADAY	375
ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	376
LAS ONDAS HERTZIANAS	378

ANEXO VI: LA UNIDAD DIDÁCTICA

INTRODUCCIÓN	381
LA ÓPTICA DE RAYOS.....	387
VIBRACIONES Y ONDAS MECÁNICAS.....	424
LA ÓPTICA FÍSICA.....	441
VISIÓN DE LA FORMA Y EL COLOR.....	477

ANEXO VII: SECUENCIACIÓN DE LAS SESIONES 492

ANEXO VIII: LAS PRESENTACIONES AUDIOVISUALES

ANTIGUOS	498
BASILISCO	499
LOS MEDIOS.....	500
LA SÍNTESIS	501

ANEXO IX: ARTÍCULO EN LA REVISTA ESPAÑOLA DE FÍSICA 502

INTRODUCCIÓN

El progresivo fracaso de matrícula y motivación que la asignatura de Física viene sufriendo desde la última década en los países occidentales tanto en las enseñanzas medias como universitarias, es motivo constante de reflexión y propuestas de mejoras a su didáctica sin que hasta la fecha se vea el final del túnel.

Nunca como hasta ahora los profesores han hecho tantos esfuerzos por la didáctica de la misma ni procurado tantas energías a menudo malgastadas. Mientras, el alumno medio asume cada vez en menor grado la necesidad del esfuerzo intelectual para superar tanto las materias instrumentales como las culturales del currículo. Los más colaboradores, aceptan de buen grado el aprendizaje de los contenidos necesarios para alcanzar su promoción social, pero en muy contadas ocasiones trascienden a su vida personal los valores culturales implícitos a estos contenidos, que también queremos transmitir.

Las décadas pasadas en nuestro país tampoco fueron demasiado optimistas en lo que se refiere a la instrucción de la población media: en los años sesenta y setenta, eran muchos los chicos y chicas que se incorporaban al mundo laboral prematuramente. Los jóvenes que no estudiaban, integrados en una sociedad conservadora, respetaban en general los valores de responsabilidad y trabajo. Los que permanecían en el Bachillerato habían sufrido ya una selección importante y el ambiente social hacía ver normal que el estudiante debía estudiar sin criticar lo que se impartía, y por supuesto aprobar. El sistema era represivo en buena medida, la formación científica del Bachillerato en nuestro país se reducía con frecuencia a los aspectos teóricos descontextualizados de la realidad, y hablar de didáctica se asociaba frecuentemente a incompetencia académica del profesor o estudiante. A pesar de ello, el estudiante era dócil, aceptaba a sus profesores y aprendía a consultar los libros con soltura, lo que le permitía adquirir una cierta autonomía y valores de responsabilidad para enfrentarse al mundo del estudio o del trabajo. En el camino, muchos descubrían también el rigor y el mundo de la cultura lo que les preparaba para una visión más amplia de la vida, aunque las condiciones socio-económicas de hace tres décadas, no daban cabida ni en la industria ni en la Universidad al considerable capital humano que quedó desaprovechado.

A la vista de la sociología actual, está claro que la situación no es mejor. Aunque los niveles político, económico, científico y didáctico han crecido ostensiblemente, nuestros adolescentes son cada vez más incultos y menos capaces de enfrentarse a problemas amplios. Los motivos del fracaso apuntan entre otros factores, al desarraigo que se asienta en nuestras vidas, a la televisión que acerca el mundo al joven sin explicarlo, al exceso de estímulos sin tiempo para ser digeridos, a la crisis de valores y modelos para los jóvenes, y ¿por qué no?, a la mejorable gestión de la enseñanza en nuestro país.

Nuestra materia lo tiene aún más difícil: a su natural complejidad, se suma la evidencia de que las salidas laborales de las tradicionales carreras de ciencias es inferior a otras relacionadas con la empresa, la sanidad, la construcción, etc., lo que la hace poco demandada. Desplazada la cultura del esfuerzo por valores más hedonistas, los chicos eligen las opciones más sencillas. Las facultades de ciencias ven disminuir su matrícula cada año e incluso las ingenierías, sinónimo antaño de promoción social, están sufriendo también esta crisis. Paradójicamente, el nivel académico de las universidades españolas ha mejorado sensiblemente respecto de hace unas décadas, y algunas tienen un merecido prestigio internacional, lo que significa que el sistema funciona para algunas minorías.

Pero además, la ciencia no interesa demasiado para el contexto personal de estudiantes y adultos: las crisis militares, sanitarias y medioambientales le han dado una imagen árida, impopular y deformada, limitada a un mundo de genios especialistas. Lo que más valora el mass-media son los programas pseudocientíficos deliberadamente ambiguos, mientras que las secciones de horóscopos y adivinos proliferan de un modo alarmante. La consecuencia es un grueso de población desprovista de unas mínimas referencias científicas, víctima fácil de supersticiones y populismos.

Reconducir esta situación para que el alumno se sienta interesado por la física, pasa porque consiga de ella y de sus protagonistas otra imagen más familiar siendo la ocasión idónea para ello el período de la Enseñanza Secundaria dado que entonces el alumno es todavía receptivo a incorporar nuevos valores a su formación. Desgraciadamente, los profesores (excepto honrosas excepciones autodidactas) carecemos de una formación humanista que nos haga capaces de informar, criticar y transmitir el entusiasmo por ampliar la visión de la ciencia a sus protagonistas y a incluirla en sistemas amplios de conocimiento que nos cualifiquen para emitir juicios de valor equilibrados.

En un intento de conseguir una alternativa más integral que la de los textos actuales, el trabajo que sigue pretende ejemplificar otra forma de trabajar los tópicos de la óptica de 2º de Bachillerato. Se adscribe a la opinión de que a edades en las que se inicia la madurez del

alumnado, enseñar sobre la ciencia es tan importante como enseñar ciencia, y de que la vía para aunar ambos aspectos es tanto el desarrollo de los aspectos prácticos y formales como el estudio de la historia de las ideas y los contextos en que estas crecen y cambian.

En sintonía con este propósito, he elegido como eje de la investigación el recabar elementos de juicio suficientes para decidir si la enseñanza de la óptica a través de los Experimentum Crucis contextualizados en su época, es aplicable a los currículum actuales. Es un reto difícil puesto que una enseñanza que apueste por la historia de la ciencia puede considerarse para algunos una pérdida de tiempo dado que el aprendizaje y maduración de algoritmos para la resolución de ejercicios formales se pueden resentir, pero pensamos, y queremos comprobar, que esta vía consigue, además de incorporar elementos de epistemología de la ciencia a su cultura básica, mejorar la motivación, incrementar la comprensión cualitativa de los conceptos básicos de los alumnos y formar un alumno más maduro que sepa buscar y criticar información, sin dejar de lado una preparación suficiente para afrontar con éxito unos estudios universitarios inmediatos.

En su estructura, la propuesta de los temas científicos se presenta en línea con algunas didácticas actuales que enfatizan la historia y el contexto de las ideas científicas y sus protagonistas a través de los experimentos cruciales que éstos propusieron. Además, pretende ser original en la metodología y los materiales de apoyo, que son recopilados en un CD, lo que los hace viables para las economías de los destinatarios y ágil para su manejo.

Una breve descripción ayudará al juicio del lector a la perspectiva global del trabajo que adjunto:

- Comienzo con un marco teórico que critica y evalúa los modelos actuales de enseñanza. El gran desarrollo de la literatura educativa en las dos últimas décadas, puede generar confusión y ello obliga a un esfuerzo de criba actualizada y selección de las propuestas.
- Sigo con una descripción del diseño de la investigación, donde se relatan la elección de los grupos de control y experimental, las fases a seguir, los protocolos elegidos, etc
- Un capítulo dedicado al desarrollo de la investigación, analiza los textos más consultados en el mercado, evalúa los resultados de los distintos cuestionarios pasados a alumnos y profesores, describe la unidad didáctica de aplicación, las actividades propuestas para optimizar el aprendizaje y los materiales de apoyo, entre los que destaca una historia de la óptica en el mundo occidental desde los griegos hasta el siglo XIX.
- Unas conclusiones finales critican los resultados e incluyen autocríticas.

- Los anexos, que recogen la bibliografía utilizada, los cuestionarios, las actividades y los materiales de apoyo citados.

Soy consciente por propia experiencia de que pretender incluir las perspectivas histórica, epistemológica y experimental en un tema, es una tarea difícil que tiene en su contra la complejidad de los procesos históricos, la inmadurez de nuestros alumnos y lo ajustado del calendario. No obstante, mi propia experiencia y la de otros autores (Izquierdo y Adúriz, 2003), me ha demostrado que dosificando de modo conveniente y asumiendo cierta simplificación, se consiguen incluir estas dimensiones en la estructura cognitiva de los estudiantes y proveerles de las referencias culturales básicas de la ciencia en un grado aceptable.

En Madrid, a 2008

Francisco J. Sotres Díaz

CAPÍTULO 1

EL MARCO TEORICO

1.1 Epistemologías de la ciencia

Aceptada la definición de epistemología de la Ciencia (Malpas, 2003) como *la rama de la filosofía que estudia la naturaleza, las fuentes y los límites del conocimiento*, continúa siendo difícil conciliar qué se entiende por fuentes válidas del conocimiento.

Distintas escuelas como las empiristas, instrumentalistas, racionalistas, idealistas, realistas, etc., han dado respuestas paralelas no siempre excluyentes al problema del conocimiento. Las alternativas son varias: ¿existe una realidad objetiva que podemos aprehender paulatinamente con nuestros sentidos o bien la limitación de éstos hace imposible su percepción, por lo que el conocimiento que obtenemos es por definición limitado y subjetivo? ¿Tiene pues relevancia buscar la certeza de las explicaciones o basta con que sean coherentes con la experiencia? Si damos por supuesto esta limitación ¿es posible conocer la realidad sin un apoyo experimental basándonos en la iluminación divina o basta un razonamiento riguroso para deducir sus verdades?

Un breve repaso histórico nos inicia en el idealismo de Platón que primaba el uso de las matemáticas para la deducción de las verdades del mundo natural puesto que los sentidos sólo dan una opinión imprecisa y no un conocimiento del mundo mientras que para el experimentalista-realista Aristóteles, las cosas están compuestas de materia y forma (la esencia). El mundo real estaría formado por objetos independientes que forman clases o especies en virtud de su esencia o formas, y conocer algo es conocer su forma gracias a que el “ánima” es una “tabula rasa”, según expresión latina, en la que los sentidos van escribiendo la experiencia del mismo modo que en las antiguas tablillas la escritura se imprimía sobre una base de cera. Sobre este primer conocimiento pasivo, la información es procesada por el intelecto (el

nous) en un proceso de inducción, lo que permite conocer la forma de las cosas y no sólo los accidentes. Esta cuestión se repite desde entonces cíclicamente en la filosofía de la ciencia: los empiristas defienden que el conocimiento que dan los sentidos sólo da acceso a un subjetivismo en la interpretación, mientras que los realistas afirman que sí puede ser objetivo (Matthews, 1992).

El instrumentalista Osiander escribe en el texto del prólogo del realista Copérnico (1982), que el modelo heliocéntrico no tiene por qué ser real, pero sí utilitario. Para el racionalista Descartes, la fuente del conocimiento que dan los sentidos es imperfecta y hay que buscar otras más válidas en nuestro interior, a partir de las verdades innatas que Dios pone en nosotros, y a partir de este conocimiento *a priori*, es posible deducir la estructura de un mundo coherente

El barroco inglés es la cuna de las concepciones modernas de la ciencia. Para los realistas ingleses sólo la observación sistemática y controlada de la naturaleza nos dará las claves para su comprensión. Tras un análisis objetivo de los datos, la vía inductiva nos permite encontrar leyes y principios generales sin necesidad de acudir a las *causas ocultas* de los escolásticos. El Newton (1971) de *Opticks*, escribe:

...Tanto en las matemáticas como en la filosofía natural, la investigación de las cosas por el método de análisis debe preceder al método de composición. Este análisis consiste en hacer experimentos y observaciones y extraer conclusiones generales por inducción, y no admitir objeciones a las mismas, si no están corroboradas por experimentos u otras verdades ciertas, pues las hipótesis no están consideradas en la filosofía experimental, y, aunque el argumento deducido por inducción de experimentos y observaciones no constituya una demostración de conclusiones generales, es, sin embargo, el mejor modo de argumentar que lo que admite la naturaleza de las cosas y puede considerarse más poderoso cuanto más general es la inducción. Y si no hay ninguna excepción en los fenómenos, la conclusión puede pronunciarse con toda generalidad. Pero si algún tiempo después se produce alguna excepción entre los experimentos, habrá que denunciar el que se produzcan dichas excepciones.

Para él, el universo es un gigantesco reloj, expresión de la armonía divina, escrito en términos matemáticos, pero su rigor de pensamiento le hace autolimitarse acerca del alcance del conocimiento natural. Recordemos las críticas de Leibnitz sobre lo absurdo de sus acciones a distancia y su propia respuesta de *Hypotheses non fingo*. Newton ve en la experiencia la vía a partir de la que se inducen principios generales. Las causas últimas de los comportamientos han de explicarse si se quiere mediante hipótesis, pero la ciencia debe contentarse al principio con la primera etapa de descripción e identificación de los principios y leyes matemáticas de la física

Los empiristas contemporáneos de Newton, como David Hume, John Locke y Berkeley, parafraseando a Aristóteles dicen que como el individuo nace sin ideas como una *tabula rasa*, es la experiencia la que va escribiendo sobre él el conocimiento y nuestras reglas de comportamiento. Siendo los sentidos una fuente de recolección de datos, son las sensaciones de los objetos y no su esencia lo que percibimos. Dios sería la causa directa de nuestras experiencias. y no el distante relojero de Newton (Berkeley, 1710).

Afortunadamente en mi opinión, para el avance de la ciencia la polémica más fructífera y operativa se centra más en la metodología que en la epistemología de la ciencia, enunciada por Newton. Aunque su ciencia se discute y supera un siglo después, pues Bernard Euler, Thomas Young y Augustín Fresnel desmontan la aparente solidez de las propiedades deducidas de sus Experimentum Crucis y su metodología inductiva, a la que se añade el principio de economía que se sigue utilizando.

En su '*Memoria de la Difracción de la Luz*', Fresnel (1819) aboga de modo brillante por este argumento cuando razona contra la existencia de los *fits*:

...La primera hipótesis (corpuscular) tiene la ventaja de conducir a consecuencias más evidentes, porque el análisis mecánico se aplica ahí de modo más cómodo: la segunda (existencia del éter) por el contrario, presenta a este respecto grandes dificultades, pero en la elección de un sistema sólo se debe tener en consideración la simplificación de las hipótesis; la de los cálculos no puede tener ningún efecto en el balance de las probabilidades: La naturaleza no se ha preocupado por la dificultades del análisis; sólo ha evitado la complicación de los medios. Parece haberse propuesto hacer mucho con poco; es un principio que el perfeccionamiento de las ciencias físicas se apoya sin cesar sobre pruebas nuevas. La Astronomía, el honor del espíritu humano, presenta al respecto una confirmación aplastante; todas las leyes de Kepler han sido agrupadas por el genio de Newton a la única ley de la gravitación, que ha servido después para explicar e incluso descubrir las perturbaciones más complicadas y menos aparentes de los movimientos planetarios

El austríaco Ernst Mach (1838-1916), conocido por sus críticas al espacio y tiempo absoluto de Newton, recoge el testigo instrumentalista de Osiander al relativizar la existencia de los átomos y la hipótesis corpuscular de su compatriota Boltzmann pues considera que no tiene sentido preguntarse sobre la existencia de objetos inobservables (Mach, 1986).

Con la llegada de las teorías cuánticas y el interés de los historiadores, filósofos y psicólogos por el fenómeno del conocimiento, la ciencia ganó nuevos matices, pues ya no estaba tan claro que la ciencia pudiera describir de modo exhaustivo la naturaleza. Las polémicas de Copenhague entre el realista Einstein y el instrumentalista Bohr decantaron a favor del último la polémica. La realidad sería inaprensible pero si conocemos sus leyes y comportamiento, podremos predecir fenómenos y por tanto progresar.

La dimensión social, olvidada en los inicios de las polémicas se admite en la actualidad de modo unánime. James Bryant Conant (1957), el citado autor de los clásicos *Harvard Case Histories*, incluía el énfasis del factor humano cuando definía la ciencia como

...Una serie entrelazada de conceptos, leyes y esquemas conceptuales que se han desarrollado como consecuencia de la observación y la experiencia y son útiles para futuras observaciones y experimentaciones...La ciencia avanza, no por la acumulación de hechos nuevos, sino por el continuo desarrollo de conceptos nuevos y fructíferos

La aparición de movimientos anticientíficos desde frentes tan diversos como el marxismo de Marcuse o los neo-anarquistas de los años sesenta fueron el detonante de una opinión anticientífica que si bien tiene muy poca influencia en los círculos universitarios, va en aumento en los ambientes menos especializados (Kragh, 2006). Por ende, para el ala anarquista más radical de esta escuela, la evidencia de lo subjetivo de estas construcciones en la concepción de la ciencia, desconectada para ellos de la realidad, sugiere que ésta se ha utilizado para adoctrinar a los alumnos alienándolos, por lo que habría que... ¡descartar su enseñanza de los centros escolares!... Esta segunda concepción, cuyo máximo exponente es el filósofo Feyerabend (2000), ha encontrado eco en algunos sectores no especializados dañando considerablemente la percepción social de la ciencia. ¿Cómo resiste esta teoría por ejemplo el hecho del descubrimiento de Neptuno por Adams y Le Verrier a partir del modelo de Newton? Aunque para los autores más radicales de esta corriente, la búsqueda de la realidad científica es ilusoria, para la mayoría se reconoce que existe un mundo real externo, pero su comprensión final es inalcanzable debido a que nuestros sentidos son limitados.

Hay que hacer un esfuerzo de clarificación de ideas porque el aluvión de opiniones al respecto oscurece y a menudo estorba al neófito. La opinión de un científico tan autorizado como Richard P. Feynman (1960) ayuda a poner a ambos lados de la balanza tanto la experimentación como el uso de los modelos que expliquen los datos.:

El principio de la ciencia, casi su definición es el siguiente: El test de todo conocimiento es el experimento. El experimento es el único juez de la verdad científica. Pero ¿cuál es la fuente del conocimiento? ¿De dónde vienen las leyes que deben contrastarse? El experimento ayuda a producir estas leyes en el sentido en que nos da pistas. Pero también se necesita imaginación para crear desde esas huellas las grandes generalizaciones para adivinar las maravillosas, simples y extraños esquemas detrás de ellos y entonces experimentar para contrastar de nuevo si hemos hecho la predicción correcta.

El austríaco Popper (1983) enriquece la concepción de la ciencia al acuñar el término de la *falsación* de las teorías científicas. Para él, cualquier conocimiento científico es provisional e

hipotético, y se mantendrá en vigor hasta que una prueba demuestre su invalidez, no entrando por tanto en esta categoría materias como el psicoanálisis que nunca podrán ser falsadas en su totalidad.

La obra del americano Thomas Kuhn (1970) inicialmente discípulo de Conan, fue otro revulsivo en los ambientes culturales, cuando expuso como su maestro que la Ciencia no es una acumulación de hechos, teorías y métodos, sino una sucesión en el tiempo de paradigmas mutuamente excluyentes. Identifica la aparición de los nuevos paradigmas con las revoluciones que rompen con las herencias anteriores. El nuevo proceso aporta unas nuevas claves para observar la realidad e interpretar problemas insolubles para el antiguo colectivo. El experimento es, por supuesto, imprescindible para el estudio de la realidad física, pero no es algo tan neutro como se pensaba: más que una colección de *hechos observados*, es más bien el corolario de *datos difícilmente conseguidos e interpretados*. Añade además una nueva dimensión sobre la validez del experimento pues distintas teorías pueden dar cuenta del mismo experimento. Lo polémico de sus tesis está en su relativista afirmación de que la ciencia es una *construcción social* y no un conocimiento de la verdad externa. Es en realidad una nueva edición de la polémica entre realismo y empirismo.

Las tesis de Popper y Kuhn eran divergentes, pues mientras que para el primero, a la mínima falsación de una teoría el científico debía abandonarla por una nueva colección de hipótesis, para Kuhn la historia de la ciencia muestra que la ciencia normal transcurre por períodos que aceptan las anomalías hasta que nace un nuevo paradigma en una revolución científica

El profesor Imre Lakatos (1970) terea en la polémica entre Kuhn y Popper acusado de un falsacionismo infantil pues era imposible una falsación de las teorías. Añade que las disyuntivas que se plantean entre dos teorías rivales y la experiencia pueden superarse si se admite que ambas teorías tienen un núcleo duro común completado por hipótesis auxiliares y propone la aportación de una nueva unidad de análisis llamados *programas de investigación científica* (los PIC). Estos se entienden como una serie de teorías encadenadas y mutuamente dependientes con un núcleo intocable de modo que no hay teorías falsas sino PIC mejorables. Un PIC es mejor que el anterior si explica mejor y predice más cosas pero si no es satisfactorio, basta con modificar las hipótesis periféricas al núcleo duro. Esta evolución de los programas se correspondería con las fases de las revoluciones de Kuhn.

El reciente constructivismo filosófico, padre de la corriente pedagógica, nace en la década de los ochenta con Bas Van Fraassen (1980) presidente por entonces de la US Philosophy of Science Association. Tiene sus antecedentes en la filosofía de Berkeley y en la filosofía instrumentalista de la antigua Grecia. Básicamente puede decirse que el constructivismo filosófico es el modelo

que mantiene que una persona, tanto en los aspectos cognitivos, sociales y afectivos del comportamiento, no es un mero producto del ambiente ni un simple resultado de sus disposiciones internas, sino una construcción propia que se va produciendo día a día como resultado de la interacción de estos dos factores.

El resumen de sus tesis sobre el conocimiento es bastante radical:

- El conocimiento es construído activamente por el sujeto, no recibido pasivamente desde el entorno.
- Empezar a conocer es un proceso de adaptación modificado constante por la experiencia del sujeto sobre el mundo

En consecuencia, según la posición constructivista, el conocimiento no es un descubrimiento de un mundo independiente, sino una construcción del ser humano, que se realiza con los esquemas que la persona ya posee (conocimientos previos), con la que ya construyó en su relación con el medio que lo rodea. La escuela argumenta que nuestras creencias y percepciones del mundo son puramente construcciones humanas, es decir, una construcción más que una percepción pasiva de los datos sensoriales. Para Van Fraassen, defensor del constructivismo empirista, el primer criterio para juzgar una teoría científica es si es empíricamente adecuada; es decir, si es coherente con los datos observables. Según él es irrelevante que la teoría sea puede ser cierta o falsa. Para él la ciencia es como la llave de una cerradura de la que no se conoce el interior del mismo modo que sucede con la clásica experiencia de la caja negra, en la que se trata de adivinar su contenido sin abrirla. El empirismo intenta que la explicación de lo observable sea coherente con un modelo, no que sea o no cierto.

Otras opiniones de esta escuela son bastante más serenas. Para M.R. Matthews (1994), el conocido director de la revista Science & Education,

...La ciencia es un sistema de conceptos, definiciones, metodologías, y organizaciones profesionales que acogen al científico individual .En tanto que el sistema de la ciencia encarna suposiciones filosóficas, ideológicas y culturales, el mundo de los científicos por tanto, estará modelada por esas suposiciones.

Frente a la polémica entre realismo y racionalismo, la conocida obra de Chalmers (1991) expresa la imposibilidad de conocer exhaustivamente la realidad porque las teorías son fruto de procesos sociales y de lo imperfecto de nuestros sentidos, luego no es posible conocer la verdad absoluta, pero sí, no obstante, incluir un mayor numero de fenómenos para su estudio que deben describir y predecir el mayor numero posible de fenómenos.

En tanto los filósofos van alternando entre estas concepciones, la mayoría de los científicos y docentes, verdaderos protagonistas de la ciencia real y marginados a su pesar de la polémica, continúan su camino pragmático: hay físicos experimentales de un lado, físicos teóricos de otro, que creen en una realidad objetiva (Lacourt, 2004) que se puede organizar progresivamente que defienden que la ciencia real ha tomado ya un cuerpo suficientemente sólido como para tener en cuenta polémicas tan discutibles como el supuesto descubrimiento de los rayos hipotéticos "rayos N" del francés R. Blondot (Klotz, 1980).

1.2 Constructivismo del aprendizaje

La brecha abierta por Thomas Kuhn con el descubrimiento de los paradigmas, abrió la puerta para que autores de otras disciplinas relacionaran la teoría del conocimiento con las teorías del aprendizaje y de la enseñanza. De hecho, esta teoría resucitó la vieja polémica entre realismo y empirismo. Puesto que el conocimiento se afianza a través de la experiencia individual que asienta constructos mentales a menudo erróneos, la instrucción debe procurar superarlos desde su detección. Lo importante es que el aprendizaje viene condicionado por los esquemas previos.

Un breve repaso de sus orígenes nos lleva a los trabajos del psicólogo Jean Piaget (1970), que descubre distintas etapas en el conocimiento de los alumnos, que el alumno ya tiene sus esquemas previos al aprendizaje y que estos constructos suponen que el proceso del aprendizaje es dinámico e individual.

Lev Vigotsky (1986) añade la importancia de la dimensión social del aprendizaje y el descubrimiento de la zona de desarrollo potencial, que permite establecer límites a la profundidad del mismo. Para él, el pensamiento debe su desarrollo tanto a la evolución biológica como al contexto social en el que el lenguaje juega un factor determinante.

David Paul Ausubel (1978) define el aprendizaje significativo como aquel en que la nueva información se relaciona con los esquemas conceptuales previos, y añade que para la instrucción es tan válida o más la metodología de exposición como la del descubrimiento siempre que se consiga este tipo de aprendizaje.

El descubrimiento de estas etapas en la evolución psicológica y la influencia del medio social, fue una contribución revolucionaria para la elaboración de los currículos nacionales, que

debieron atenerse a estas evidencias. En el prefacio de su libro *'The Process of Education'*, el psicólogo Bruner (1960) escribió sobre :

...la convicción de que estamos en el principio de un período de nuevos progresos y trabajos en la creación de currículo y caminos para enseñar ciencia .

El constructivismo en la enseñanza parte de que el conocer cómo se aprende es la base de cómo enseñar. Sí queremos destacar que este movimiento es fundamentalmente una teoría del aprendizaje y no de la enseñanza. Desde los años ochenta este movimiento ha sido la referencia, en su mayoría favorable, de todos los foros educativos. El descubrimiento de la existencia de las distintas etapas de Piaget y de los preconceptos de Rosalind Driver (1985; 1986; 1989) dieron al alumno el protagonismo del fenómeno, pues las posibilidades del aprendizaje vienen determinadas por lo que el alumno ya conoce sobre el mundo que le rodea. Sus bases de partida son ya conocidas:

- Los estudiantes llegan a nosotros con unas ideas previas fruto de su experiencia y enseñanza anteriores
- Estas ideas hacen de filtro que afecta a las nuevas observaciones e interpretaciones
- Existen vínculos emocionales con los viejos esquemas que les hacen muy resistentes al cambio.

Al igual que los paradigmas en ciencias, los nuevos esquemas deben integrar las experiencias iniciales. En sus inicios, incluso se supuso conocida la receta óptima para la enseñanza: los programas-guía para la docencia (Driver , 1986) proponían :

- La detección y explicitación de las ideas previas, en problemas concretos que sean de interés del alumno.
- Utilizar ejemplos que produzcan conflictos cognitivos con sus ideas iniciales.
- Utilizar los conceptos elaborados por los científicos que resuelven el conflicto.
- Usar las nuevas ideas en varios contextos para promover su total asimilación.

Uno de sus principios más vigentes es la importancia que se da al protagonismo del alumno, frente a las teorías precedentes behavioristas. Para Driver (1989)

...el Currículo no es algo que hay que enseñar sino un programa de tareas, materiales y recursos que capacitan al alumno para reconstruir sus modelos del mundo para acercarse más a los científicos.

Podemos resumir que el constructivismo es una teoría sobre los límites del conocimiento, una creencia de que todo conocimiento es un producto de nuestros actos cognitivos. Nuestra

comprensión se construye a través de nuestras experiencias y el carácter de ésta está profundamente influido por nuestras lentes o paradigmas cognitivos (Confrey, 1990).

En los inicios de la propuesta constructivista, se proponía la vía de redescubrimiento, puesto que Piaget establecía un paralelismo entre las etapas psicológicas y las históricas. Hoy se ha descartado con buen criterio su validez pues un alumno no puede redescubrir sin la ayuda de un experto tópicos tan difíciles como la estructura atómica y que hay otras estrategias al menos igual de válidas para conseguir estos fines. De hecho muchos constructivistas admiten métodos inicialmente denostados en las pedagogías que utilizan, primando que los conocimientos que consigan sean significativos.

Que esta escuela sigue teniendo fuerza, lo demuestran los cientos de artículos al respecto, y el hecho de que varios países como Estados Unidos, Nueva Zelanda, Australia, España, Portugal, Israel, Canada, Reino Unido, etc. hayan incluido más o menos explícitamente sus orientaciones.

Así por ejemplo, en el borrador del programa del US National Science Education (NRC) se reconocía que la historia, filosofía y sociología de la ciencia, deben contribuir a la formación del currículo científico. Curiosamente, la descripción que se da en el proyecto de la filosofía de la ciencia es constructivista. Desde una óptica que calificaban como posmodernista, en el texto se cuestionaba la objetividad de la observación y la verdad del conocimiento científico, lo que desató grandes polémicas. En la actualidad, la AAAS (American Association for the Advancement of Science) fundada en 1845, que reúne a más de tres mil profesores tiene el ambicioso *Proyecto 2061* (la fecha del próximo regreso del cometa Halley), fundado en 1985 pensado para sus alumnos hasta el grado K-12. Con unas metas mucho menos elitistas, sus textos '*Science for all Americans*' y '*Benchmarks in Science*', incluyen tópicos de historia de la ciencia, las matemáticas, la tecnología, sociedad y cuerpo humano entre otros. Su metodología apuesta decididamente por el constructivismo en los materiales que va editando.

Tras dos décadas de protagonismo absoluto, el constructivismo empieza a criticarse desde distintos frentes. El exceso de escuelas hace que no sea una teoría compacta a la que critican incluso sus protagonistas. La última crítica más frecuente viene apoyada por las teorías del conocimiento científico (SSK) que afirma que todo conocimiento tiene una construcción social (Osborne, 1996; Varela 1989). Como respuesta, ha tomado fuerza la escuela que establece paralelismos entre el alumno y los investigadores noveles que se adscriben a un equipo para resolver un problema concreto. Para ella, la construcción del conocimiento científico es un producto social asociado con la existencia de varios equipos científicos, lo que aplicado a la enseñanza sugiere la organización de los alumnos en grupos pequeños y facilitar su interacción

con la comunidad científica representada por el profesor, los textos, etc..(Wheatley, 1991; Gil, 2002).

Otra crítica es que en su versión más radical, la escuela no reconozca la existencia de una verdad absoluta independiente del pensamiento humano en contra del buen sentido que ha hecho avanzar a la ciencia (Matthews, 1993; Phillips, 1995; Phillips,1997). De hecho la mayoría de los constructivistas son ontológicamente realistas aunque manifiesten lo limitado de los sentidos para entenderla.

Aplicado a la enseñanza, los materiales generados dan un buen resultado cuando se aplican en grupos reducidos y una atención personalizada. Los conocidos programas-guía que sugieren sus ideólogos, no son una panacea aunque en algunos casos se hayan hecho buenas ejemplificaciones. Exigen mucho tiempo y energías para su elaboración, lo que unido a lo apretado de los programas de los últimos cursos de enseñanzas medias los hace poco viables. Autores poco sospechosos de behaviorismo, (Ernst, 1993; Matthews, 1997) reconocen que lo mejor de la pedagogía constructivista se ha hecho sin una epistemología constructivista.

Críticas aún más frontales como la del citado Helge Kragh (2006) expresan que durante las dos últimas décadas los estudios científicos han sido dominados por el constructivismo social y la sociología del conocimiento científico. Para él, esta teoría no puede explicar la mayoría de los casos de las ciencias físicas. Llevada a sus extremos podría incluso significar el fin de la física. Esta crítica no implica un rechazo a los aspectos culturales o sociales en las ciencias de la educación.

La asunción de la importancia del contexto social por algunos investigadores, ha dado lugar a propuestas que defienden que la construcción del conocimiento deberá asociarse con el tratamiento de situaciones problemáticas que tengan relevancia e interés para el alumno (Gil, 2002) y le motiven para asumir responsabilidades de ciudadanos responsables (Aikenhead, 1985). En esta situación se encuentran las orientaciones clave de este movimiento ejemplificadas en la práctica con escasas muestras y distinta fortuna pues el mundo editorial no quiere asumir riesgos innecesarios. Es una contradicción común que mientras desde algunas instancias oficiales se apueste por la innovación educativa, los textos de los últimos cursos de las enseñanzas medias y los programas de Selectividad presentan escasas veleidades pedagógicas y la consecuencia es que el profesorado se limita en su mayoría a transmitir sus contenidos con la mejor claridad posible. Para autores como French (1986), *el ingrediente crucial para el éxito de cualquier innovación educativa es el profesor de aula* pero nuestra capacidad de decisión y de actuación en los currículum actuales de los últimos cursos de la enseñanza secundaria es muy limitada.

En un constante retorno a las fuentes, Kruckeberg (2006) propone retomar aspectos del mensaje de Dewey como son la formulación del papel del conocimiento y los conceptos científicos para readaptarlos al constructivismo como herramientas para integrar y transformar la experiencia.

1.3 La ola de los proyectos educativos de ciencias

El relevante lanzamiento del primer satélite artificial, el Sputnik, por la supuestamente atrasada Rusia en 4 octubre 1957, hizo de revulsivo en todas las sociedades occidentales y, de rebote, en sus ambientes educativos. A partir de años sesenta, tanto las instituciones gubernamentales como académicas occidentales decidieron que la educación merecía la importancia suficiente para invertir en medios abundantes que cuajasen en proyectos que fueran viables y mejorasen el nivel técnico de la población.

Con este detonante se iniciaron en Estados Unidos varias experiencias que sirvieron de catalizador para su ampliación a Europa:

- La presión social y las ayudas para que la enseñanza media elevase su nivel y fuera el trampolín para la Universidad, fue uno de los motivos para que el científico del MIT Jerrold Zacarías, conocido por sus investigaciones sobre el radar en la II guerra, fuera convocado por la National Science Foundation para elevar el rigor de los contenidos las enseñanzas medias de su país. Con una enorme profusión de medios y equipo humano, en el que se integraron científicos de la talla de Bondi, Rossi o Friedman, se editó el *'Physical Science Study Committee'* con una clara orientación conceptual. El PSSC (1960) con gran equipo humano y profusión de medios, se convirtió en la referencia mundial en la formación de futuros científicos. Tras el informe de la conferencia de 1957 de la Asociación Americana de Profesores de Física, el texto *'Improving the Quality and Effectiveness of Introductory Physics Course'* (Steering, 1957) enunciaba siete objetivos exigibles que son recogidos en el texto de Holton (1958), *'Fundamentos de la Física Moderna'* que se convirtió a su vez en otro hito de la comunidad educativa.
- En 1957 James Bryan Conan (1957) que antes había escrito *'On understanding Science: An Historical Approach'* (Conan, 1947), publicó el clásico *'Harvard Case Histories in Experimental Science'* con el propósito de divulgar la ciencia para no especialistas (futuros abogados, médicos, profesores, escritores etc.) que se adoptó en multitud de centros de Enseñanza Media. En él se relatan seis historias de científicos y su obra, en las

que con un lenguaje carente de formulación matemática, se integran los aspectos sociales, científicos e históricos de las mismas. La experiencia fue muy bien valorada y aún hoy es un referente de la ciencia humanista.

- En la década de los años sesenta, aparecen en Inglaterra los ‘*Nuffield Science Courses*’, los cuales reivindican el experimentalismo de Amstrong, olvidando sus estudios históricos y proponiendo una vía inductivista de los métodos científicos.
- *The British Association for Science Education (ASE)* en 1963 elabora el informe ‘*Training of Graduate Science Teachers*’ donde achaca a la escasa preparación de los profesores los fracasos del programa y pone el dedo en la llaga refiriéndose a ellos cuando afirma que:

...muchos actúan y piensan científicamente como consecuencia de su formación, pero fallan en la comprensión de la naturaleza y fines de la ciencia. (Young, 1980)

- En 1964, a instancias de la National Science Foundation (NSF) se inició el conocido proyecto del ‘*Harvard Project Physics*’ que culmina en 1970. Participaron en él F. James Rutheford, Gerad Holton y Fletcher G. Watson. El nuevo proyecto encuadró la enseñanza de la Física en una perspectiva intelectual más amplia y menos exigente que el PSSC, incluyendo tópicos de historia y filosofía de la ciencia, metodología e interacciones de la Física con la sociedad, como por ejemplo la termodinámica con la Revolución Industrial, los trabajos de Faraday con los avances eléctricos o los trabajos de Fermi con la polémica nuclear. Uno de sus autores, Rabi, expresa su concepción humanista de la ciencia del siguiente modo:

...Propongo que la ciencia debe enseñarse en cualquier nivel, desde el más bajo al más alto, en una vía humanista. Debería enseñarse con una comprensión histórica, con una comprensión social y con una comprensión humana en el sentido de la biografía, de la naturaleza de las gentes que hicieron esta construcción, los triunfos los ensayos, los fracasos,...

Durante los años setenta más de 300.000 alumnos lo cursaban anualmente, pero los controles externos que evaluaban unos contenidos más específicos y la hostilidad de la administración Nixon hacia los científicos provocaron la progresiva devaluación del proyecto (Holton, 2003).

A excepción del Project Physics, tras la euforia de los PSSC, CHEM y NSCS y los Nuffield, en la que la enseñanza propodéutica de las Ciencias fue apoyada desde las instancias oficiales con profusión de medios, lo cierto es que a pesar de su innegable calidad, llegó la crisis: el alumno medio no tenía ni la motivación ni la capacidad para seguirlos con provecho. Desgraciadamente lo elitista de la concepción del PSSC se tradujo en que sólo un 4% de los dos millones de

estudiantes de enseñanzas medias de los Estados Unidos (Holton, 2003) lo siguieran. Ya en 1974 se les acusó de centrarse en la estructura de los conceptos, dejando de lado la tecnología y las aplicaciones de la ciencia a la vida diaria, lo que provocó rechazos a la ciencia entre los alumnos menos brillantes. Más bien se trataba de formar futuros científicos que de proveer las bases para la comprensión de la ciencia, de informar de las tecnologías de su tiempo y de integrar los estudios humanísticos con los científicos como sería de desear. Tampoco aparecen en estos proyectos implicaciones de la ciencia para la vida personal ni las implicaciones de ésta para la sociedad (Longbrake, 1974). La Convención de la Asociación Nacional de Profesores de Ciencias de Estados Unidos en 1972, tenía como tema *‘Alternativas en la Educación Científica’*. La constatación de la existencia de distintos ritmos y capacidades de aprendizaje dió lugar a experiencias en los niveles elementales que ofrecían una variedad de distintos estilos de aprendizaje como la de la Universidad de Wisconsin (Klausmeier, 1971). Con distintos estilos, se referían al hecho de que algunos niños necesitan actividades motoras para casi todo su aprendizaje mientras que otros pueden aprender rápidamente por transmisión oral o escrita. Además, mientras que algunos necesitan ser guiados, otros no menos inteligentes, son más independientes y creativos aprendiendo mejor en actividades abiertas. Finalmente, la diversidad también se manifiesta en el hecho de que otros alumnos trabajan mejor individualmente que en grupo.

Tras esa asamblea surgieron iniciativas (Burkman, 1973) que hoy nos son familiares como la creación del grupo ISIS (Individualized Science Instructional System), que desarrollaba módulos cortos de ciencia de una duración de unas 125 semanas en las enseñanzas medias. Otro ensayo fue el movimiento de educación ambiental entendido de modo interdisciplinar entre las ciencias experimentales y sociales, el arte y el lenguaje.

Según Matthews (1994) describe refiriéndose al proyecto, *su ambiciosa intención fue centrarse en la estructura conceptual de la física y enseñarla como una disciplina*. El hecho es que las circunstancias cambiaron: desde mediados de los 70 la amenaza rusa había disminuído, Estados Unidos puso su hombre en la Luna, la matrícula escolar en las materias científicas comenzó a decaer de modo alarmante, y los cambios sociales hicieron necesaria una vuelta de página en la que aún estamos inmersos.

Las teorías constructivistas iniciadas en los años ochenta, con una fundamentación inicial en la epistemología del conocimiento, añadieron la componentes individual y social al mundo de la enseñanza. Dado el protagonismo de este movimiento en todos los ambientes educativos durante las últimas décadas, la gran variedad de escuelas ha hecho que pierda coherencia y no se tenga un mensaje claro del mismo. Es para diferenciar sus propuestas válidas de las más

discutidas, por lo que he considerado necesario un repaso de sus bases epistemológicas, psicológicas y didácticas.

1.4 El experimento en la ciencia y en su enseñanza

En estas fechas en que muchos constructivistas se cuestionan el valor objetivo del experimento para el conocimiento de la realidad a favor de que sólo existen constructos mentales, los docentes habíamos perdido la confianza en el valor que éste tiene como test definitivo de las hipótesis, pero de ahí a relativizar como se ha hecho con frecuencia en algunos foros constructivistas el conocimiento de la realidad hasta sus últimos extremos, nos parece caer en una frivolidad intelectual que no aguanta un análisis serio. La ciencia que predice resultados ulteriores sigue avanzando gracias a las astronómicas sumas de medios que se invierten en experimentación, cosa que no se haría de haber dudas sobre la validez y necesidad de las ciencias experimentales. Pocas personas se atreven ya a cuestionar la necesidad de la dimensión práctica tanto la en la epistemología de la ciencia como en su enseñanza, pero a menudo hemos visto que se tienen distintas concepciones de su validez en la adquisición del conocimiento.

No siempre ha habido consenso en el objeto y metodología de la ciencia ni del papel que el experimento juega dentro de su epistemología. La ciencia moderna nace con Newton, su matemática y el experimento controlado que le permite inducir principios generales. En el siglo XIX, siguiendo su tradición, era aún dominante la visión inductivista que describía de modo matemático las regularidades observadas en un experimento a las que proponía después explicaciones físicas (Koponen, 2006). A partir de 1830 en Alemania se mira a los datos experimentales como representación de regularidades útiles para el descubrimiento de nuevos fenómenos, examinar su naturaleza y establecer conexiones nuevas entre los ya conocidos.

A principios del siglo XX, la comunidad científica se decantó hacia la vía hipotético-deductiva (Duhem, 1954). Así, para Thompson, la investigación experimental era la observación y experimentación sistemáticas cuyo objeto era el enunciado de leyes y la formación de teorías (Smith & Wise, 1989). El objeto de la teoría sería para él el hacer posible la inclusión de los resultados experimentales en forma matemática.

Popper ya había enunciado que su función era la de refutar (falsar) la validez de la teorías (Popper, 1959) aunque Einstein lo rebatió (Einstein, 1970) cuando propuso que el papel del

experimento sería el de apoyar la teoría. El inefable Feymann (1960) se expresa en términos semejantes atribuyéndole una función de verificación cuando recuerda que

El test de cualquier conocimiento es el experimento. El experimento es el único contraste de la verdad científica.

En los años ochenta, Kuhn descubre la importancia de los paradigmas como los anteojos que nos ayudan a entender de forma distinta la realidad. Previene que la interpretación de los datos depende a menudo de lo que andamos buscando. Hay demasiados ejemplos de que un descubrimiento fuera el resultado de una búsqueda dirigida y otras en las que el progreso se vió bloqueado por una teoría previamente “cargada”. Para él, el relato que los libros de texto hacen de los experimentos son justificaciones de la teoría (Kuhn 1970) que se pueden inferir a partir de su conocimiento.

Desde las dos últimas décadas, la función inductivista del experimento procurando evitar sus aspectos simplistas y una visión estrecha de esas consideraciones, que refuerza las falsaciones en la generación del conocimiento ha vuelto a tener vigencia. Se ha dado en llamar *la justificación generativa del conocimiento* al punto de vista que refuerza el papel del descubrimiento y la generación del nuevo conocimiento sin caer en la simple inducción según el nuevo término (Nickles ,1993; Gohau 1980). Los experimentos son la base del nuevo conocimiento y se interpretan de acuerdo con la teoría existente, pero en ese proceso, el cuerpo del conocimiento teórico también se ve transformado. Tras una etapa en la que la experiencia jugaba sólo un papel de contraste, en la actualidad se considera que es una fuente del conocimiento conceptualmente tan válida como la teoría. Es fruto de la herencia cultural que necesita de la aprobación de la comunidad científica. Aunque en algún caso su aparición pueda ser fortuita, como fue el caso de Becquerel, la mayoría de las veces es fruto de una búsqueda apoyada previamente en los paradigmas de su autor.

...El descubrimiento es un producto colectivo fruto de la herencia cultural. Además, necesita de la comunidad científica para ser aprobado .Mientras el descubrimiento de Becquerel es neutro, las experiencias deYoung vienen dirigidas por sus ideas sobre las ondas.

En educación el experimento se usa con otros fines menos ambiciosos. El uso que seguimos haciendo con frecuencia de los laboratorios en los centros de enseñanza en forma de los clásicos guiones de prácticas realizadas en sesiones de una hora, consigue unos efectos mínimos en la mejora de la comprensión de los tópicos científicos. En su inmensa mayoría los guiones se plantean como evidencias que ilustran la validez de una teoría o como aprendizaje de técnicas, lo que confiere una visión muy ingenua a la experimentación. Los estudiantes a quienes se les

presentan los experimentos para reforzar su atención en los fenómenos físicos y para ilustrar las ideas científicas, piensan con frecuencia que la ciencia no son más que hechos y leyes que hay que aprender y entender. Sin embargo, esta concepción está desligada de las preguntas más profundas: el conocimiento objetivo o subjetivo de la ciencia y cómo este conocimiento justifica que la educación científica puede ayudar a entender el proceso de la ciencia como un cuerpo fiable de conocimiento: experimentación y observación, análisis de los datos, predicción y falsación y el escrutinio crítico de la comunidad científica. El no enseñarlo así con el tiempo suficiente produce los lamentables resultados que nos son tan familiares. Lo cierto es los trabajos prácticos tienen poca importancia en el conocimiento de los alumnos (Watson, 1953) y que los beneficios de los trabajos prácticos en la comprensión de los alumnos sobre el carácter de la física también es cuestionable (Millar, 1989). A pesar de lo bienintencionado de sus autores, en los inicios de la LOGSE se pensó que la enseñanza por descubrimiento autónomo podría ser un revulsivo en la didáctica de la ciencia aunque pronto se vio que dos milenios de ciencia no pueden reinventarse por unos adolescentes a partir de unas experiencias predirigidas en sesiones de una hora.

La reproducción del experimento (Hodson, 1990;1992;1994) debería conseguir en el estudiante una oportunidad para participar en la construcción y adquisición del conocimiento, y para entender cómo se generan las leyes y los conceptos en física. La nueva visión del experimento lo contempla como una integración de los aspectos manuales, intelectuales y de la interacción social. Para optimizar su uso, es recomendable no dirigir a los estudiantes sobre lo que deben ver. Es preferible un clima en el que la interacción de las cuestiones con la observación abra el camino para el conocimiento. Este proceso lleva tiempo pero es mucho mejor que proporcionar respuestas secas. A los estudiantes les gusta pensar por sí mismos y merecen este disfrute. Los alumnos pasivos se desentienden con más facilidad.

En las últimas versiones del constructivismo personal, la experiencia tiene una importancia crucial, ya no tanto en la indagación de la realidad sino en la efectividad del aprendizaje. Las actividades con implicaciones intelectuales mayores que aquéllas que sólo verifican experimentos, han sido propuestas por varios autores (Arons,1993; Redish,1994). Para ellos el experimento es una herramienta tan poderosa como el razonamiento y es un medio de que el estudiante tenga una oportunidad de participar en la adquisición y construcción del conocimiento, de que compruebe cómo se justifica y de entender cómo se generan los conceptos y leyes en física. Durante el proceso, la interacción social toma una importancia hasta poco desatendida. A esta interacción se le está asignando una gran importancia puesto que en ella aparece la oportunidad de que el estudiante exprese sus ideas en sus propias palabras, que reflexiones sobre su propio aprendizaje y que corrija sus errores y explicita su razonamiento

intuitivo. Una voz tan autorizada como la de Hodson (1990), da un nuevo argumento cuando dice que los trabajos prácticos mejoran el interés, la motivación, las técnicas la comprensión de los conceptos, la apertura de la mente y la objetividad.

En tanto lleguemos en nuestro país a un cambio sustancial en las programaciones oficiales que permita tiempos para integrar pequeñas investigaciones en los temarios, como es el caso del currículo francés, es muy pequeño el margen de maniobra que nos queda. Tanto las sesiones de prácticas regladas (si se hace el esfuerzo de superar sus limitaciones tradicionales) como las experiencias de cátedra mantienen en mi opinión su utilidad. Para Márquez (1996) son muchas las ventajas pedagógicas que se derivan de las demostraciones de aula pues ponen de manifiesto el carácter experimental de las ciencias físicas, ayudan a la comprensión de los conceptos científicos, para que sean adquiridos, siempre que sea posible, por vía de la experimentación, ilustran el método inductivo, ayudan a establecer conexiones entre el formalismo de la física y los fenómenos del mundo real.

1.5 El Experimentum Crucis en la enseñanza

El paradigma del experimento histórico es el *Experimentum Crucis*. Este vocablo lo acuña Roger Bacon (2004), el ideólogo de la ciencia moderna, en su '*Novum Organum*', la obra que da respuesta al '*Organum*' de Aristóteles, como el instrumento que aclara las disyuntivas en una *Instantiae Crucis* (cruce de caminos), en clara alusión a los cruces que aparecían en los caminos de la época. Poco después, Robert Hooke, Robert Boyle e Isaac Newton se lo apropiaron pretendiendo obtener de él el argumento definitivo para sus teorías.

Cuando parecía un término obsoleto, el físico francés François Arago lo recuperó en 1838 cuando proyectaba la experiencia del cálculo de la velocidad de la luz en distintos medios partir de unos espejos rotatorios utilizados por Wheastone, aunque no llegó a finalizarla por culpa de la Revolución de 1848 y sus problemas posteriores con la visión derivadas de una diabetes de madurez. El fin del mismo era decidir de una vez para siempre entre las teorías ondulatoria y corpuscular de la luz. A sus compatriotas Fizeau y Foucault les cupo el mérito de cerrar con éxito la experiencia.

A pesar de lo que pensaban sus pioneros, los conocidos *Experimentum* tuvieron también una limitación epistemológica en sus planteamientos: el prisma de Newton fue correctamente criticado por Euler, los anillos de Newton que él utiliza como argumento para sus corpúsculos,

los vio Hooke como un apoyo indiscutible a su teoría ondulatoria. El resultado negativo de la experiencia de Michelson-Morley en 1887, demostró para Einstein la inexistencia del éter en contra de lo pensado por sus predecesores Faraday y Maxwell y el mismo Michelson. Poco después, la desviación de los rayos del sol a su paso por las proximidades de Mercurio en el eclipse en 1919 registrada por el astrónomo Eddington fue un refuerzo crucial a las nuevas tesis de Relatividad Restringida de Einstein. Si no se hubiera observado esta desviación, ello no significaría revalidar la teoría de Newton porque la antigua era muda simplemente al respecto, con lo que sólo se manifestaba que la evidencia de la limitación de la experiencia crucial. Como último ejemplo, el descubrimiento del efecto fotoeléctrico por Lenard en 1902, que Einstein (1970) había interpretado como evidencia crucial de su teoría corpuscular, fue descartada poco después ante la evidencia de la simultaneidad de las naturalezas corpuscular y ondulatoria de la luz y la materia.

El físico francés Pierre Dunhem (1954) hizo una crítica epistemológica en profundidad del término en la que relativizaba su validez, puesto que dada la cantidad de hipótesis implícitas no suficientemente criticadas que acompañan a la experiencia, el Experimentum no tiene la capacidad de invalidar totalmente una teoría, ni tampoco de sustituir una explicación novedosa. No obstante, su referencia como atalayas de los paradigmas sucesivos de la ciencia, los hace sumamente útiles para revisar las distintas concepciones de la ciencia y aplicarlos a la enseñanza como estrategia didáctica y ejemplificación insustituibles.

Tras el aparente fracaso de los proyectos didácticos de Conan y Holton, en los últimos veinte años estamos observando un renacimiento en los intentos de asociar la didáctica de la ciencia con la historia de sus ideas y sus protagonistas donde el experimento histórico de ha revelado un magnífico medio. Si se sabe hacer, el experimento histórico presenta ventajas respecto al convencional: da una visión global del proceso que incluye los aspectos sociales y epistemológicos, elimina el dogmatismo asociado a los descubrimientos científicos, ayuda a la empatía con los científicos y con ello a la motivación por la asignatura. Para Kipnis (1998) el experimento histórico es un medio de reforzar las ideas científicas preferible al experimento de la vida diaria porque el resultado ya es conocido y ayuda a la comprensión de tópicos históricos concretos y porque las posibilidades de éxito del estudiante son mayores que con los experimentos convencionales.

Aceptada la conveniencia de incluir tópicos históricos en la enseñanza, hay distintas opiniones sobre su dosificación y su puesta en práctica. La exposición familiar de las historias científicas implica el riesgo de entender la historia de la ciencia como un relato sucesivo de hechos históricos y como una empresa intelectual que olvidaría los aspectos prácticos. Su sólo

aprendizaje daría una visión muy parcial de la misma si lo que queremos es profundizar en su naturaleza. Otro tanto puede decirse de ceñirnos exclusivamente a la enseñanza de las técnicas experimentales desligadas del contexto y de su encaje en la teoría que generan o que las incluye como verificación.

Ya existen precedentes acerca de su aplicación a las aulas (Höttecke, 2000) que discrepan en cuanto a la fidelidad que se debe guardar a su reproducción: desde los que defienden una reproducción lo más ajustada posible a la experiencia original como es el caso del *Research Group on Higher Education and History of Science* (Universidad de Oldenburg), hasta los que ven más conveniente simplificarlos a su exposición a como descubrimientos guiados (Kipnis, 2007) acompañados de comentarios en pequeños grupos, trabajos personales y lecturas de textos originales, o la experiencia similar danesa de Poul V. Thompsen (1998). Las evaluaciones realizadas sobre su puesta en práctica son optimistas en la mejora obtenida en las actitudes y la concepción más interdisciplinar de la ciencia, pero se echan en falta evaluaciones a largo plazo que comparen los mismos ítems con otros grupos más tradicionales. Es comprensible que suceda así porque una práctica que sea voluntarista sin el apoyo explícito de los organismos oficiales tiene que luchar contra las actuales corrientes pragmáticas de padres, alumnos y universidades que ven con frecuencia en la dimensión histórica un bonito adorno que a veces estorba las reválidas de promoción y la comprensión de los principios científicos.

1.6 Los precedentes en la enseñanza de la historia de la ciencia

La Revolución Francesa aportó a la divulgación de la ciencia su conocida Enciclopedia (Diderot, 2002) aunque su incidencia quedó reducida a las clases ilustrada de la época. De hecho, hasta el siglo XIX la cultura era patrimonio casi exclusivo de la Iglesia y las Universidades. Es a raíz de la aparición de la Revolución Industrial, cuando en toda Europa nacen movimientos que propugnan cambios en la educación para atender a las masas proletarias que se convertían en mano de obra cualificada. Ernst Mach (1986) y J.F. Herbet en Alemania, Condorcet en Francia, John Dewey en USA y Thomas Hussley, T. P. Nunn y Henry Amstrong en Inglaterra son las referencias obligadas.

Inglaterra se convierte en el país occidental pionero en enfrentarse a la divulgación y formación de la ciencia entendida como sirviente de ésta. La referencia con la se que inicia el proceso en Inglaterra es el texto *Natural Philosophy* de James Ferguson (Matthews, 1994) publicado en 1767 cuando se está iniciando la Revolución Industrial. Ferguson era un artesano especialista en la

construcción de telescopios y relojes, miembro de la Royal Society. Hombre autodidacta, con una clara vocación hacia la Física Aplicada, escribió 10 libros sobre mecánica, electricidad, astronomía, óptica y mecánica newtoniana, además del referido texto (Henderson, 1870, Millburn, 1983, Matthews, 1994). Su objetivo, claramente utilitario, era hacer accesible la Física a la población joven sin formación matemática dotándola de unas habilidades experimentales y técnicas útiles para cualificar a una generación recién salida del medio rural para integrarse en las cadenas de montaje o grandes siderurgias, como ya intentan otros textos de la época. A consecuencia de su éxito, se imprimió en 1806 una nueva edición del mismo para los Estados Unidos prologada por el científico Brewster. Desde entonces, la cultura anglosajona ha sido la pionera en los movimientos de innovaciones pedagógicas.

Una de las opciones que aparece ya entonces, fue la de introducir tópicos de Historia de la Ciencia en los currículos, siendo su máximo exponente fue el Duque de Argyll (1855) en Glasgow, que durante su discurso inaugural de la *Asociación Británica para el Avance de la Ciencia*, propuso un manifiesto claramente liberal:

Lo que queremos en la enseñanza del joven es, no tanto los simples resultados como los métodos, y sobre todo, la historia de la ciencia.... eso es lo que debemos enseñar, si queremos ver la educación correctamente dirigida hacia los grandes fines que se pretenden.

Este exhorto, más ignorado que seguido, fue el caldo de cultivo para que una minoría intentase aportar algo de la historia de la ciencia a la formación científica. La Filosofía Natural entró paulatinamente en las escuelas de la mano de Charles Mayo y Richard Daves (Matthews, 1994) pero en las clases altas apareció de inmediato el miedo a formar un pueblo crítico, y como consecuencia, en 1862 se revisó el curriculum suprimiendo las ciencias de la enseñanza primaria. Poco después, la BAAS (British Association for American Studies) la reintrodujo en 1867 con más énfasis y en 1870 se hace pública un acta gubernamental que implanta la enseñanza obligatoria de los alumnos entre 5 y 12 años, no sin fuertes resistencias debidas al referido miedo a las masas cultivadas. Al final del siglo Henry Amstrong expresó críticas abiertas al sistema que consideraba explícitamente perjudicial y propugnó en su lugar por los métodos heurísticos con apoyo experimental.

Medio siglo después, esta concepción de la enseñanza adquiere una dimensión más amplia: figuras de primera línea como el filósofo John Dewey (1902, 1997) en Estados Unidos que ya expresa la alienación que supone la dualidad entre la personalidad del alumno y los programas a impartir, ante cuyo conflicto aconseja *psicologizar* el currículo, el físico vienés Ernst Mach o el profesor de la universidad de Londres Thomas Percy Nunn (1920), refuerzan la importancia de las ciencias en la

educación. Desde el momento de su implantación nacieron los debates acerca del tipo de ciencia a impartir, según que los estudiantes fueran a proseguir estudios en la Universidad, o que finalizaran sus estudios. En los inicios del siglo XX, el citado Amstrong (1910), un químico consagrado, vuelca su interés hacia la educación, proponiendo los métodos heurísticos con el propósito de dar a los estudiantes una oportunidad de *obtener su conocimiento directamente*. Como Mach, piensa que la experiencia precede a la teoría y que el método heurístico debe ser histórico. Fue el creador de una tradición en la didáctica de la investigación educativa que se caracterizó por potenciar la dimensión histórica, las actividades con alumnos y la investigación.

La convulsión de los valores tradicionales que supuso la primera guerra mundial, desencadenó un gran interés en la Historia de la Ciencia, aunque de nuevo en ámbitos reducido a las minorías. Ya en 1917, la British Association for the Advancement of Science (BAAS, 1917) identificaba los tres principios clave a lo largo del desarrollo histórico de la Ciencia: *wonder, utility and systematization*, es decir, *preguntas, aplicaciones y sistematización* (Jenkins 1989) y los extrapola en distintos grados a los estadios del estudiante. Al finalizar la primera gran guerra, las contradicciones que afectaron a la ciencia como eran el uso de las armas químicas, la urgencia en la formación de los científicos, etc., crearon polarizaciones que nos son familiares: de un lado la corriente literaria que acusaba de bárbaros a los científicos, mientras que éstos justificaban su subordinación a los intereses nacionales. Esta nueva sensibilidad, unida al riesgo de fomentar especializaciones demasiado prematuras, se plasmó en distintas intervenciones como el curso que organizó el University College de Londres en 1921, *Historia y métodos de la Ciencia*, similar a los que aún hoy ofrece la School Science Review y la aparición en Inglaterra en 1936 y 1937, de revistas de historia de la ciencia (Jenkins, 1990)

El referido organismo, BAAS, ya era consciente en aquellos tiempos de que el método heurístico era un medio de mejora en la enseñanza de la ciencia en las escuelas. En un informe, ya advertía contra el riesgo de una concepción experimentalista:

...desafortunadamente, al concentrar la atención en los métodos experimentales, la enseñanza complementaria de la ciencia como un cuerpo de principios inspiradores y una influencia auténticamente humanista, ha sido descuidada (BAAS 1917).

El mismo documento añade :

...debería haber más componente del espíritu y menos del valle de los huesos secos, si la ciencia quiere mantener un interés vigente tanto durante la escuela como, después... Un modo de conseguirlo es mediante lecciones de historia la ciencia, de biografías y descubrimientos, con el estudio de sus éxitos y sus fracasos y énfasis en la principal vía a lo largo de la que ha avanzado el conocimiento natural. (BAAS, 1917)

La nueva crisis en los valores que supuso la segunda gran guerra, incidió de nuevo en la enseñanza. Su revisión, dio lugar al reconocimiento de los aspectos sociales, humanitarios y prácticos, y a su inclusión en el currículum educativo. A partir de entonces aparecieron distintas opciones entre las que la Historia de la Ciencia ocupaba un lugar importante:

En 1946 aparece la *British Society for History and Science (BSHS)*. Coexistieron en ella distintas tendencias educativas: la más utilitaria pensada para el futuro consumidor (*Consumer Education*, 1945) en Estados Unidos que defendía una concepción liberal. También en 1945 se elabora el informe del *Harvard Committee*, (Conan, 1945) con un informe preliminar del entonces rector de Harvard y colaborador del armamento nuclear americano James Bryant Conan que defendía democratizar la universidad americana heredada de la tradición elitista inglesa con la introducción de tópicos históricos en los currículos científicos. Conan pensaba que era más fácil entender la naturaleza de la ciencia estudiando cómo ésta se había desarrollado desde sus etapas más tempranas (Conan, 1958)

En 1952, Gerard Holton publica el clásico '*Introducción a los conceptos y teorías de las Ciencias Físicas*' (Holton 1952) en el que se estudian los conceptos desde su contexto social e histórico. El libro con el que muchos profesores nos sentimos en deuda, abre en los años sesenta, las puertas de una nueva forma de enseñar ciencia.

1.7 Nuevas razones para la historia de la ciencia

Cuando parecía que la Historia de la Ciencia estaba relegada sólo a eruditos o mentalidades liberales amantes de integrar todos los saberes, las nuevas crisis en la enseñanza de la ciencia y en los valores de la sociedad, aconsejan dirigir la investigación hacia otras vías, y la citada historia ocupa un lugar prioritario. Frente a los currículos pensados para futuros científicos o técnicos, la inclusión de la historia de la ciencia puede dar cabida a una dimensión más humanista de la misma pensada para ciudadanos que puedan entender la importancia nacional de la ciencia así como para recibir los mensajes científicos básicos, socializarse, entender la física de cada día, aprovechar su dimensión socializadora, criticar la moral de la ciencia oficial para integrarla en sus nuevos valores, y no olvidar en lo posible la observación del “outsider” frente al fenómeno (Fowler, 2002; Aikenhead, 2003). Otros autores argumentan que el hecho de que la historia de la ciencia incluya otras disciplinas como la filosofía antigua, los principios de la ciencia natural, las influencias recíprocas entre ciencia y tecnología, el desarrollo social determinado por los descubrimientos, etc. contribuye a una comprensión más amplia de los

acontecimientos científicos y de nuestro modo de vida. Además, la historia de la ciencia establece puentes entre mundos tradicionalmente tan distantes como los artistas y los científicos (Leite, 2002).

Las voces actuales tanto personales como institucionales que reivindican su incorporación a los currículum son del peso suficiente como para una breve revisión de sus argumentos:

Destaca entre ellas la del ya citado director de la revista australiana *Science & Currículum*, Michael R. Matthews (1992; 2000), con una extensa obra en la que defiende y ejemplifica la aplicación de la enseñanza de la ciencia como herramienta interdisciplinar para conseguir una formación cultural básica. Para él se trata de conseguir el reencuentro de la historia de la ciencia con las ciencias de la educación. Este reencuentro recoge la tradición liberal que parte de las tesis de Aristóteles en cuanto que la belleza, bondad y verdad son metas ideales a conseguir, rescatadas (y parcialmente olvidadas) en el siglo pasado por educadores y científicos de la talla de Pierre Duhem, Ernst Mach, James Conant y Gerald Holton . Para el alumno sería más conveniente esta vía de acercamiento a la ciencia porque su salud mental mejora al considerar la ciencia como una actividad más cercana y próxima al conocimiento real y a la percepción de la realidad. En suma, le acerca más a la filosofía.

Quizás el argumento central más frecuente a favor de enseñar sobre la ciencia además de enseñar ciencia, es que así el alumno sale del proceso con una visión más global y funcional del fenómeno (Holton, 1952), así como con una mayor implicación personal derivada del conocimiento de que sus protagonistas son personas concretas (Novak, 1985)

La ciencia de la escuela gravita en su mayor parte alrededor de los textos que en gran parte la presentan como una colección de hechos. Además, a diferencia de otras materias, seleccionan una colección de éxitos, en clara contradicción con la realidad, lo que puede desanimar a los estudiantes. Un conocimiento aunque somero de los descubrimientos con la descripción de sus contextos, las metodologías, técnicas y el paradigma en el que reacomplan o recrean, modifica para bien esta imagen. (Kipnis, 2005)

Las recomendaciones de Hodson (1988; 1992) van también en este sentido cuando dice que en la didáctica de nuestra materia se debe procurar:

- Enseñar ciencia
- Enseñar sobre la ciencia

- Enseñar a hacer ciencia.

El segundo ítem pasa por conocer rudimentos de la epistemología, cuya contextualización es impensable sin el conocimiento de las historias de los conceptos, de las personas y de las sociedades que constituyen nuestro paradigma actual de la ciencia. Es ahí, acotando para las enseñanzas medias, donde vamos a centrar nuestra propuesta, dado que el tema ya está suficientemente tratado en los niveles universitarios y ámbitos educativos. Por ejemplo, Rosalind Driver (1986) propone que :

...el aprendizaje de la ciencia implica iniciarse en la cultura de la ciencia. Si a los alumnos se les da acceso al conocimiento de los sistemas de la ciencia, el proceso de construcción del conocimiento irá más allá de la experiencia personal. Los alumnos deben tener acceso no sólo a las experiencias personales sino también a los conceptos y modelos de la ciencia convencional.

Para Thomas Kuhn (1970) la actual estructura de los libros de texto, ya sea por selección o por distorsión, es puramente acumulativa, y contribuye a una mala interpretación de la ciencia, como si ésta trabajase desde sus inicios con los mismos problemas, sin tener en cuenta el hecho de que las revoluciones científicas aportan nuevas claves para su comprensión.

Otros argumentan que ya sean consumidores o tomadores de decisiones, los individuos en una sociedad necesitan comprender los poderes y limitaciones de la ciencia con el propósito de vivir de modo más seguro con ella (Ziman, 1980). Para otros, su historia puede contribuir a hacer más viva la materia provocando un mayor interés. Otros argumentos señalan que un conocimiento de la naturaleza de la Ciencia puede ayudar a conocer sus logros y sus límites, incluyendo las cuestiones que la ciencia puede y no puede resolver, y los temas éticos implicados.

Pero no sólo son voces individuales las que defienden estas perspectivas. Los países afines a nuestra tradición cultural como Estados Unidos, Australia, Inglaterra, Nueva Zelanda, y, en menor medida, Francia, incluyendo España, incluyen directrices recomendando la inclusión de perspectivas históricas en sus curriculum. Algunos ejemplos ayudan a ilustrarlo:

A instancias del profesorado que le requería actualizar su viejo ‘*Project on Physics*’, Holton ha colaborado recientemente en una versión remozada, el texto ‘*Understanding Physics*’ (Cassidy, 2002). El referido 2061 *Project* de Estados Unidos en su ‘*Benchmarks for Science Literacy*’ (AAAs, 1993) justifica:

...Hay dos razones principales para incluir algún conocimiento de la historia entre las recomendaciones. Una razón es que la generalización de cómo operan las empresas científicas estaría vacía sin ejemplos

concretos... Sin ellos la proposición de que las nuevas ideas están limitadas por el contexto en que nacen, no sería más que un eslogan.

Otra razón es que algunos episodios en la historia de nuestra aventura científica son nuestra herencia cultural a no olvidar por las nuevas generaciones. En ellos hay que incluir el papel de Galileo para cambiar nuestra percepción de nuestro lugar en el Universo, la demostración de Newton de que las mismas leyes se aplican al movimiento de los cuerpos celestes y terrestres, las observaciones de Darwin sobre la variedad de las formas de vida lo que le llevó a postular un mecanismo de su desarrollo, la cuidadosa documentación de Lyell acerca de la increíble edad del Universo, y la identificación de Pasteur de las enfermedades infecciosas con diminutos organismos que sólo pueden ser vistos con un microscopio.

El curriculum francés con una vocación eminentemente experimental, añade la dimensión histórica entre las ideas centrales para su ciclo central de sus cursos 5º y 4º del *collège* (BO 1995):

...La enseñanza debe destacar que la física y la química son elementos de cultura esenciales que muestren la inteligibilidad del mundo. La extraordinaria riqueza y complejidad de la naturaleza y de la técnica pueden describirse por un pequeño número de leyes que constituyen una representación coherente del universo. En este espíritu se debe hacer una llamada a la dimensión histórica de la evolución de las ideas. Debe igualmente hacer un gran sitio para las ciencias del universo: la astronomía y la astrofísica.

El Nacional Currículum inglés en su Key Stage 4 que corresponde a nuestro 4º ESO dice textualmente:

Los alumnos deben ser instruidos sobre

- a) cómo son presentadas las ideas científicas, evaluadas y publicada.(por ejemplo por publicaciones o comentarios de otros científicos).*
- b) Cómo las ideas científicas pueden nacer de las distintas formas de interpretar las evidencias empíricas (por ejemplo la teoría de la evolución de Darwin)*
- c) los caminos en los que trabajan los científicos pueden verse afectados por los contextos en que conviven (por ejemplo social, histórico, moral y espiritual) y cómo estos contextos pueden afectar a la aceptación de estas ideas.*
- d) considerar el poder y las limitaciones de la ciencia para tratar con las cuestiones sociales industriales y medioambientales, incluyendo aquéllas a las que la ciencia no puede contestar, como son las incertidumbres en el conocimiento científico y los temas éticos implicados.*

En nuestro país las recomendaciones tienen una orientación claramente constructivista en las que la dimensión histórica tiene también una pequeña parcela de intenciones. Las instrucciones para la ESO (RD 2001) y para la Física de Bachillerato (RD 2002) son idénticas.

...La metodología deberá, por tanto, basarse en un correcto desarrollo de los contenidos, lo que precisa generar escenarios atractivos y motivadores que sitúen al alumno en cada uno de ellos. También requiere

incluir diferentes situaciones puntuales de especial trascendencia científica, así como el perfil científico de los principales personajes que propiciaron la evolución y desarrollo de la Ciencia.

Un último argumento es que en la reconstrucción de los experimentos históricos se conoce de modo global el contexto en que nace el fenómeno, se producen dialécticas que mejoran la comprensión de las teorías, modelos, conceptos y leyes, además de entrenar la imaginación y el procesado crítico de datos (Höttecke, 2000; Hosson, 2007). Sé por propia experiencia que conocer los contextos de las ideas científicas y sus protagonistas añade claves para su comprensión y motivaciones para su estudio, de otro modo inalcanzables. Aunque en otras materias se trata la epistemología científica, la orientación con la que se hace, está a mi entender desligada de la realidad científica (quizás por la procedencia de quienes la imparten) y no consigue la empatía con la ciencia que sería de desear. El que el alumno descubra en ejemplos concretos las obras de los antiguos, le revela que eran personas tan sobresalientes como los grandes científicos actuales, que sin su herencia no tendríamos este conocimiento, y le abre las puertas de un mundo excitante que tenía vedado. En una cultura en que la autoridad se cuestiona sistemáticamente, el conocimiento objetivo de sus líneas de trabajo, transmite a nuestros adolescentes interés, respeto y la reconciliación intelectual con los mayores.

La perspectiva del pasado que confiere el conocimiento de la historia de la ciencia es válida también para proyectarla al futuro (Izquierdo, 1996; 2006). Sin ella, la imagen que nos hacemos de la Ciencia es lineal, no sujeta a cambios ni críticas como cualquier rama de la cultura, y es por ello conveniente que el ciudadano no la supralore.

En las experiencias anteriores, el papel del profesorado era clave. Aunque los citados proyectos americanos, dedicaron grandes sumas a la formación inicial del profesorado que los iba a impartir, esta formación adoleció de continuidad. En otros países occidentales, los profesores carecían en su mayoría de una formación adecuada y de la ayuda para adquirirla (Kindi, 2005). So pena de caer en la improvisación, es necesaria una sólida comprensión de la historia de las ideas científicas y de sus protagonistas lo que lleva organización y tiempo, así como un acopio de recursos que le ayuden a poner en práctica estas reproducciones.

La realidad de nuestro país es que a excepción de escasos autodidactas (Marco, 1986; Moreno, 2000), la formación de los profesores de enseñanza secundaria se reduce a la lectura de biografías y de artículos aislados. A ello se suma el hecho de que en el último curso de Bachillerato, la Selectividad impone una dinámica, de la que es difícil salir sin que la preparación académica de los alumnos se resienta. Bien es cierto que en algunos textos aparecen pequeñas biografías de científicos (Edebé, SM) y un capítulo inicial dedicado a la filosofía de la

ciencia, e incluso en un caso puntual (Física, McGraw Hill) se ensaya una metodología en la que las ideas científicas se exponen en un contexto histórico, pero pocos son los profesores que hacen caso de estas directrices porque no las valoran como prioritarias frente al control externo de la Selectividad. No obstante, algunos pensamos que no atender a estos tópicos es un error de los que establecen los perfiles de los futuros enseñantes (Sotres F. , Moreno A., 2007).

1.8 Los precedentes en la enseñanza de la óptica

Una vez expuestos los precedentes más significativos de la enseñanza de la Historia de la Ciencia desde una perspectiva histórica, procede una revisión de las publicaciones e investigaciones (Moreno, 1993) relacionadas con la docencia de la óptica. La literatura consultada al respecto en las revistas especializadas, es mucho más abundante en los tópicos de visión y óptica geométrica, que en los de óptica física porque el estudio de esta disciplina junto con la Astronomía es el más antiguo en el tiempo. En ellos se muestra un paralelismo entre la evolución histórica de los conceptos y los estadios de los preconceptos ópticos en la infancia. Casi todos los autores consultados abundan en que la detección de éstos aboca a la idea clave de que los alumnos consideran en su mayoría que la luz es un ente asociado con la fuente luminosa o el objeto, o a veces un medio luminoso estático, y no una entidad dinámica desligada de ambos que se emite constantemente y se hace perceptible por doquier merced a la difusión de la luz en la atmósfera o los objetos, lo que genera una serie de errores que comentaremos. La lectura de estos precedentes me ayudó en gran manera a centrar mi propia investigación.

Andersson y Karrqvist (1983), trabajando con pupilos de entre 12 y 15 años, establecieron como idea clave que la luz es algo que existe en el espacio y se propaga a modo de mensajero en el espacio y el tiempo independiente del foco y el observador. Como resultado de sus trabajos llegaron a la conclusión de que sólo el 30% de los estudiantes la entienden con claridad lo que justifica las dificultades subsiguientes en el aprendizaje de la óptica por falta de unos cimientos sólidos. Esta supuesta independencia explica que a veces la información obtenida en la imagen no sea fidedigna ni en la posición ni en la forma.

Entre los primeros investigadores que estudiaron las ideas de los alumnos acerca de la luz tenemos a Guesne de la Universidad Denis Diderot de París que trabajó con alumnos de 13 a 14 años y Tiberghien, que hizo una investigación paralela con alumnos de 10 a 11 años. En las conclusiones que recoge Guesne (1984), encontraron que se pueden hacer dos grupos de

alumnos: unos que identifican la luz con la fuente o sus efectos y otros que la consideran como una entidad separada en el espacio. En el primer caso los alumnos son incapaces de interpretar los fenómenos y únicamente notan la similitud entre los objetos y sus sombras o la presencia de la imagen de la fuente en el espejo. En el segundo caso los alumnos intentan interpretar a qué se debe la sombra diferenciando la fuente de sus efectos incluso llegan a una idea de reflexión. En este segundo grupo se encuentran fundamentalmente los alumnos de 13-14 años. La mayoría de los alumnos investigados por Tiberghien piensan que los objetos se ven porque están iluminados por una fuente de luz, pero no lo relacionan para nada con el que la luz despedida por los objetos tiene que llegar a nuestro ojo.

También pioneros en la interpretación de las imágenes por alumnos de 16 años con un aprendizaje previo intenso en el cálculo de posiciones y tamaños dados por sistemas ópticos de un objeto, mediante diagramas de rayos, son A. Fawaz y L. Viennot (1985) adscritos a la Facultad de Educación de la Universidad Paris VII. Centran el estudio en la óptica geométrica “inerte” (lentes delgadas convergentes) y en la óptica “viva” (visión de las imágenes). Interrogados sus alumnos sobre cuestiones de predicción en la formación de imágenes de una vela dadas por lentes convergentes o por una cámara oscura, se ponen en evidencia las dificultades en diferenciar la visión de una imagen real en un plano en el que se coloca o no una pantalla, la visión de la imagen que se observa en ese punto a ojo desnudo y las relaciones entre luminosidad y nitidez de la imagen obtenida en una cámara oscura.

Todo ello les lleva a una reformulación de unos objetivos nuevos en la enseñanza de la óptica geométrica elemental:

- Insistir en que en el principio de correspondencia estigmática entre el objeto y la imagen, un punto objeto corresponde a un punto imagen, una muestra de rayos que salen de un punto objeto permite pronunciarse sobre la convergencia en un punto imagen de todos los rayos que salen de un mismo punto y atraviesan la lente, y que una muestra de parejas de puntos objeto-imagen permite pronunciarse sobre el conjunto de las parejas correspondientes al objeto entero y la imagen entera.
- Profundizar en el tratamiento del flujo energético aún a sabiendas de que es un concepto difícil.
- La inclusión del ojo como sistema óptico formador de imágenes.
- Reforzar la dimensión práctica mediante la construcción de dispositivos sencillos

El profesor W. Kaminsky (1989) de la Universidad Paris VII, presenta un informe sobre la concepción que los alumnos (y otros) tienen sobre la luz. En la óptica geométrica. En él destaca la citada E.

Guesne en primer lugar que a las edades entre los 10-14 años, aún no se comprenden los tópicos de la existencia de luz entre la fuente y el objeto iluminado, la propagación rectilínea de la luz, y el papel de la luz en la interpretación de la visión: la mayor parte de los niños no identifican ningún mediador entre el ojo y el objeto, pues para ellos la luz sólo interviene para iluminar el objeto o para constituir un baño general luminoso. Ayudado por una serie de experiencias de en las que intervienen lentes convergentes que forman una imagen en una pantalla salen a relucir la poca atención que se ponen en la importancia del ojo como intérprete final de la imagen, la consideración casi común (enseñantes incluidos) de que el algoritmo de construcción de rayos ha establecido la creencia de que la luz puede ser observada transversalmente. De estas consideraciones deduce que en la enseñanza del tema, además de insistir en la mecánica de la construcción de imágenes se debería insistir en la interpretación cualitativa con cierta profundidad en estos temas.

Sólo dos años después, la conocida pionera en sus trabajos sobre constructivismo, Rosalind Driver (1985), editó un texto ya clásico que inspiró en buena medida nuestra Reforma LOGSE, en el que clasifica por edades la evolución de las ideas científicas previas de los alumnos entre las edades de 12-15 años. Entre ellas dedica un apartado a la luz con preguntas como qué es la luz, dónde está la luz, la diferencia entre sombra y penumbra, propagación en línea recta, la lupa, la conservación de la luz., los espejos y las interacciones entre la luz y la materia.

Describe las dificultades de los alumnos en relacionar la claridad ambiente con el sol o la incapacidad de muchos para entender la reflexión de la luz en el papel blanco o la relación entre la visión y la imagen virtual. Repite el referido hallazgo de Andersson de que el alumno tiene mucha dificultad en entender la luz como una entidad en el espacio desligada del foco que la genera y del receptor, cuestión que una vez reconducida, es clave para la interpretación de imágenes de dispositivos ópticos y el mismo ojo entendido como sistema óptico.

Poco después, un artículo puntual de Amarjit (1990) investiga sobre esta misma línea con grupos de alumnos entre 15 y 19 años en Nueva Zelanda. Tras comentar que la mayoría de los textos tratan de modo superficial cuestiones como la reflexión y refracción simultáneas, achaca a ello parte de la mala comprensión de la reflexión y refracción. Después de hacer un análisis muy exhaustivo de las respuestas de los alumnos ante casos de reflexión y refracción en superficies de geometrías distintas, concluye que los alumnos en su mayoría, en lugar de acudir a la Ley de Snell como principio básico particularizado a las distintas situaciones, eligen su respuesta en función de dicha geometría.

Que la comunidad científica funciona como una aldea global, lo prueba el hecho de que en Tasmania, Sue Cawell (1995) repite investigaciones similares con alumnos asiáticos y llega a conclusiones parecidas: alega que aunque se pueden entender sin demasiado esfuerzo los

algoritmos de construcción de imágenes, aplicación de las fórmulas de las lentes y espejos, etc.... el problema básico es de nuevo desligar el concepto de luz de su asociación con el foco o el objeto iluminado. Desde una perspectiva constructivista, indagan los conocimientos iniciales, proponen experiencias para favorecer el constructo interactivo de los propios esquemas y concluyen con varios test que sondan el cambio conceptual a los seis meses de la acción. El resultado fue muy optimista en su propio relato. Como una estrategia novedosa es de destacar que para decidir si la visión sigue un proceso extromisivo o intromisivo, proponían relacionar la percepción de todos los sentidos (olor, gusto, tacto, oído y visión) y sus sensores que convierten las percepciones en estímulos nerviosos que viajan hacia el cerebro.

También Argentina cuenta con cierta tradición en el estudio de la Óptica Geométrica. Marta Pesa (1995) describe la existencia de preconceptos, razonamientos asociados y modelos personales no científicos nacidos de la necesidad de dar sentido a las experiencias en temas como la naturaleza de la luz y su propagación. Critica que en los textos se disocie la reflexión especular de la formación de imágenes lo que contribuye a las confusiones al respecto. En claro paralelismo con la evolución histórica, destaca la concepción holística de la propagación de la imagen. Por otra parte comenta el escaso tratamiento en los textos de la reflexión difusa y su importancia en la formación de las imágenes reales en pantallas traslúcidas.

La misma autora, Marta Pesa, en colaboración con Leonor Colombo (1999) relata su experiencia en un curso de formación de profesores sobre la enseñanza de la polarización de la luz en el que los profesores noveles volcaban sus ideas previas sobre el tema. Se comprobó que había una incomprensión considerable en la física de los fenómenos, que la realidad se confundía con el modelo, y un recurso frecuente a limitarse al algoritmo para la explicación del mismo, sin acudir a las causas físicas responsables. Incluso se pusieron en evidencia ideas previas comunes a los alumnos. Entre los logros positivos del curso, los alumnos-docentes destacan las ventajas de los trabajos en grupo que les permiten aclarar dudas, la posibilidad de relacionar los modelos teóricos con las actividades prácticas, el reconocimiento de su deficiente formación basada en algoritmos sin explicar y en el desconocimiento de los límites de los modelos. Las conclusiones manifiestan la incorrecta construcción de los conceptos básicos, la aplicación de formas precientíficas de razonamiento, la persistencia de los errores conceptuales y, la necesidad de replantear la enseñanza desde una perspectiva global de las ondas para otras ediciones de formación.

A un nivel académico más elevado, la brasileña Julia Salinas (2000) relata su experiencia pensada con el objetivo de mejorar el aprendizaje de los conceptos y métodos mediante actividades experimentales centradas en los aspectos cualitativos del fenómeno que integren las

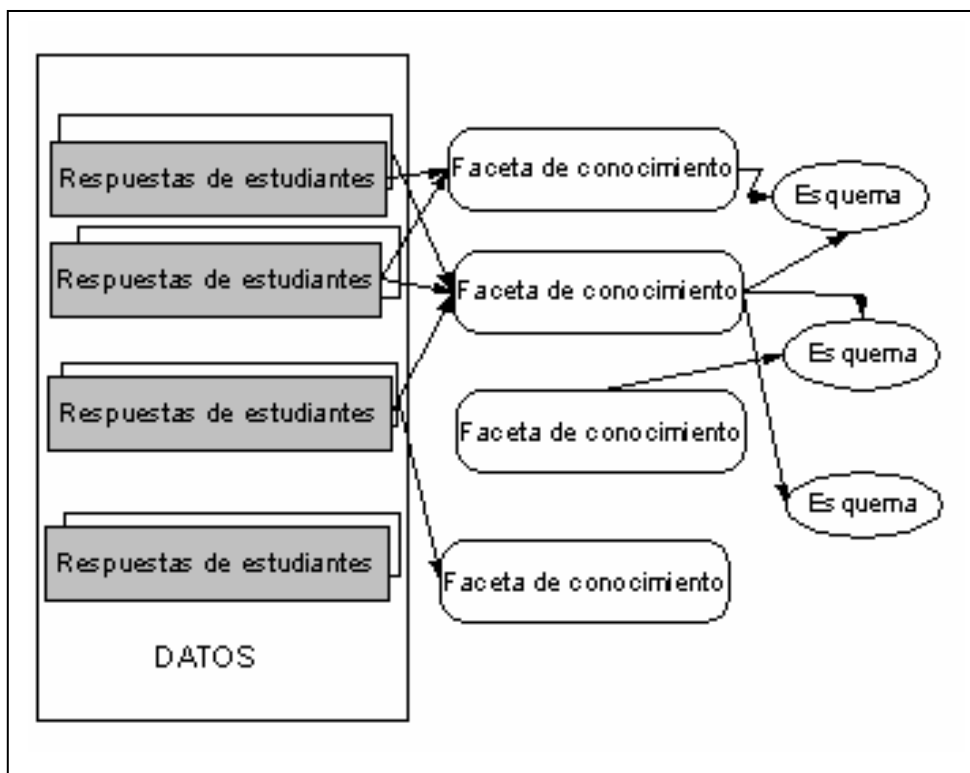
dimensiones teórica y la experimental. A partir de dos problemas sencillos, propone la predicción por escrito del resultado, el diseño experimental y la discusión final en grupo donde el alumno contraste sus predicciones iniciales con los resultados experimentales y los principios de la Óptica, identificando las causas de las discrepancias. La autora centra el estudio de la Óptica Geométrica con aspectos usualmente abandonados en los textos de Enseñanza Media como son la importancia del ojo en la observación de la imagen, la diferencia entre la obtención de una imagen real en una pantalla y su observación a ojo desnudo en la misma posición, y la inclusión de los diafragmas de campo y abertura en los montajes ópticos. Su inclusión proporciona un aprendizaje más contextualizado de los instrumentos ópticos: el uso del diafragma de abertura ayuda a interpretar el concepto de intensidad luminosa y la influencia del tamaño de la lente en el de la imagen. El diafragma de campo explica el pequeño diámetro de los oculares de los instrumentos ópticos.

Galili I. y Hazan A. (2000) destacan el hecho de que la dificultad histórica de identificar los parámetros asociados a la luz como son su velocidad o su longitud de onda, hacen muy difícil la interpretación correcta de la formación de la imagen o la difusión de luz por los objetos, así como que se perciba el proceso de la formación de la imagen como instantáneo, pues la luz aparece como estacionaria y continua. De otro lado, el hecho de que nuestra experiencia siempre la asocie a viajar a través del aire o el agua dificulta aún más su estudio sistemático. .

Para su investigación desarrolló una serie de test clasificados por temas:

- El acto de la visión
- Las propiedades generales de la luz (luz en el espacio, luz procedente de un foco)
- La luz a su paso por rendijas
- La formación de sombras e imágenes en refracción y reflexión.
- El color procedente de la radiación y de la reflexión.

Desde la teoría constructivista elabora un nivel superior de una estructura jerárquica en términos de *facetas de conocimientos* (que pueden agrupar respuestas originarias de preguntas distintas) y *esquemas* del conocimiento. En lugar de presentar los errores individuales, los esquemas proporcionan las bases para un diseño para métodos de instrucción más efectivos. Sobre la identificación de errores expresados en otros trabajos, sugiere modificaciones en el currículo.



De nuevo el autor Galili (2001) confesado constructivista, narra la experiencia de un curso de óptica desde una dimensión histórica con una muestra bastante numerosa de alumnos israelitas de 10º grado, el último curso para muchos de física. Tras los conocidos argumentos acerca de las imprecisiones en la percepción de la ciencia por los alumnos, que los cursos tradicionales no pueden corregir, argumenta que, dada la diversidad de intereses, la vía histórica para el aprendizaje permite educar en valores duraderos como integridad, curiosidad, apertura a las nuevas ideas, escepticismo e imaginación. Frente a la dificultad de conseguir textos de esta índole asequibles para los alumnos relata la elaboración propia de material en lo que coincide con mi propuesta. Tras la instrucción analiza las siguientes dimensiones: relaciones entre ciencia y tecnología, actitud hacia la ciencia del pasado, influencia de los factores externos sobre la ciencia y sus productos, concepciones sobre las teorías científicas, opiniones sobre la fiabilidad del conocimiento científico y la percepción crítica de la ciencia por los alumnos. Los resultados de la experiencia con alumnos fueron claramente favorables para el grupo experimental.

Dentro del panorama nacional, un trabajo de Luis Osuna (2001) constituye una aportación destacable al panorama de la didáctica de la luz y la visión. Los ítems de partida son ya conocidos: tras el paralelismo entre los errores históricos y las preconcepciones de los alumnos y tras su detección y análisis, propone una enseñanza basada en problemas concretos que consigan la interacción suficiente para alcanzar un aprendizaje significativo. Un análisis de los problemas históricos, da lugar a la selección de problemas y las estrategias a aplicar.

También en nuestro país, Sánchez (2001) relata sus propuestas experimentales realizadas con un puntero laser y una cubeta con agua destilada o bien con un gradiente de densidades variable con la que estudia las leyes de Snell o aplicaciones tan espectaculares como la obtención del *rayo verde* (ya descrito por Julio Verne) en un laboratorio escolar.

Dos profesores de la Universidad Denis Diderot de Paris (Hirn & Viennot, 2002), son los autores de la investigación con alumnos del grado 8º de francés (12 años) sobre los temas de fuentes de luz y reflexión difusa, color, propagación rectilínea, visión y lentes. La investigación se basa en la idea de que durante una investigación, los profesores no son transmisores pasivos sino que transmiten sus propias tendencias y como utilizan mal las estrategias para corregir los errores de los alumnos, y lo que hacen es añadir algunos elementos en lugar de discutir los símbolos que han usado. La corrección de estas prácticas implica un entrenamiento de profesores mejor planificado y un diseño de secuencias innovadoras.

Laurence Maurines (2002) de la Universidad Sur de Paris, tiene una dilatada experiencia en las investigaciones didácticas de óptica desde una perspectiva constructivista. A partir de una experiencia con alumnos universitarios pretende establecer un modelo de razonamiento de los alumnos en temas de óptica ondulatoria a partir de sus interpretaciones previas

Romdhane I. y Maurines L. (2003) se centran en una experiencia universitaria desarrollada en Francia y Túnez sobre la didáctica de la óptica ondulatoria. Tras la exposición del tema, se les pasó a los alumnos un cuestionario sobre la doble rendija, los espejos de Fresnel y la lámina de caras plano-paralelas con cuestiones como: ¿Cómo explican los estudiantes las figuras de interferencia obtenidas con luz cuasi monocromática? ¿Dependen del tipo de interferómetro? ¿Cómo explican que sólo determinado tipo de fuentes produzcan interferencia?

Los análisis de los cuestionarios mostraron la persistencia de errores en la comprensión de la fase, las coherencias temporal y espacial, o la imposibilidad de interferencia entre frente de ondas paralelos, la no descomposición en puntos emisores para focos extensos o el uso incorrecto de las leyes de la óptica geométrica. Como estrategias didácticas, recomienda dibujar simultáneamente el rayo con sus frentes de onda asociados a fin de destacar la naturaleza ondulatoria de la luz, precisar las condiciones de interferencia desde el principio y destacar la necesidad de dos rayos coherentes para producir interferencias.

Una tesis avalada por el Departamento de Física de la Universidad de Extremadura y presentada por Julia Gil (2003) se adscribe a la variante constructivista de la Teoría de la Elaboración, que en síntesis se resume como el acercamiento a un tema sucesivo en etapas sucesivas marcadas

por la etapa cognitiva del alumno. En coherencia con su credo, detecta preconceptos, elabora mapas conceptuales y elige el fenómeno físico como elemento organizador. Es novedoso que achaque la responsabilidad de las teorías implícitas o preconceptos a los textos escolares, al solapamiento de la terminología vulgar con la científica, a las propias observaciones del alumno, a la cultura propia de cada colectivo y a la formación de analogías. Tras describir la teoría de la elaboración como el acercamiento desde lo global a lo particular y de lo concreto a lo abstracto elabora un material de enseñanza acorde con estas teorías. Cada capítulo se inicia con un problema abierto seguido de varias cuestiones al estilo de las experiencias precedentes no históricas, que van construyendo el pensamiento del alumno. Finalmente, La autora relata su satisfacción con los resultados obtenidos

Once años después, el profesor Anderson (2004) publicó un nuevo trabajo con el doctorando Franch Bach sobre los mismos temas. En él, los autores recuerdan la necesidad de la investigación en la didáctica de la ciencia para optimizar el aprendizaje así como la dimensión práctica. Dada la separación con frecuencia insalvable entre ambos aspectos, defienden la posibilidad de estructurar un cuerpo teórico trabajando conjuntamente los investigadores universitarios con profesores de aula: en una primera fase se hace el diseño con la definición de objetivos y la secuencia del aprendizaje, y en una segunda se pasa a la práctica y se evalúa para la posible retroalimentación. La investigación está basada en las concepciones iniciales y las dificultades en la comprensión de ciertos tópicos. Ejemplifican esta propuesta definiendo una fase de diseño y otra de ensayo. Llamam a esta teoría *orientada en los contenidos* (*content-oriented theory*). Desde una clara concepción constructivista de la Ciencia que definen como un cuerpo de ideas creadas por los seres humanos, reivindica la importancia del profesor como referencia para la construcción de conceptos por el alumno. Los alumnos no pueden aprender por observación y experimentación sino con la ayuda de expertos. A la hora de llevar a la práctica este desarrollo, los profesores debían insistir más en los informes individuales para reforzar los aspectos escritos y en grupo, estructurar pequeños grupos de trabajo que trabajen en discusiones orales de los tópicos y en crear un ambiente de libertad en el que alumno se sienta cómodo para expresar sus ideas y pensamientos. Tras estas consideraciones generales, proponen tres temas claves para trabajo:

- ¿Cómo conciben los estudiantes la luz y qué implica eso para su enseñanza?
- ¿Cómo conseguir que el estudiante piense activamente y con interés sobre la luz y sus propiedades?
- ¿Cómo motivar al estudiante a discutir y escribir sobre la luz y sus propiedades? .

Basados en la propia experiencia y la de otros investigadores proponen como idea clave para la enseñanza de la óptica el hecho de que la luz no es algo estático, sino que viaja constantemente

de los focos (puntuales o extensos) hasta los objetos y ello permite tanto su visión (por reemisión de la luz hasta nuestros ojos) como el tamaño y la formación de sombras y penumbras. Propone también la condición de Kepler de que para la formación de la imagen el cono de luz que encuentra una superficie refractiva converge en un punto. Critica que los textos suecos de grados 6-9 olvidan esta idea clave lo que fomenta el fracaso de su comprensión. En un apartado dedicado a la crítica de los textos, constatan el hecho de que en varios de ellos se identifica el modelo con el fenómeno (se representan los haces transversales de la luz de un modo continuo). Propone que el rayo luminoso se explique como un artificio matemático que marca la trayectoria que sigue la luz. El resumen de su exposición finaliza comentando la inexplicable persistencia de algunos errores tras la acción didáctica y los favorables resultados obtenidos en la experiencia global.

En noviembre de 2004 aparece la tesis de Cecille de Hosson (Hosson, 2004) apoyada por la Universidad Diderot. Centrada en el mecanismo de la óptica de la visión. (difusión de la luz y viaje de ésta por el ojo). Elegida ésta como eje, relata las bases de óptica geometría , fisiológica y física implicadas . Propone también el uso de la historia de la ciencia para la didáctica de la óptica y la visión desde la concepción de ésta asociada a la entrada de luz en el ojo, extremo que los alumnos no suelen asociar más que en el caso del deslumbramientos (el argumento de Alhazen). En una secuencia bastante parecida a mi trabajo, iniciado en fecha anterior, hace una descripción sucinta de la historia de la visión que finaliza en Descartes. A fin de reforzar la empatía, el diálogo se estructura en diálogos de personajes la manera de los de Galileo. Se comprueba además que la identificación con los personajes histórico favorece la comprensión de las tesis que sostienen.

En una investigación de índole más amplia, el sueco Kipnis (2005), más interesado por la evolución de las ideas científicas que por sus autores, tiene un trabajo muy interesante que versa sobre el riesgo de introducir la analogía de enseñar conceptos difíciles comparándolos con otros sencillos. Un ejemplo de ello es el tratamiento de la refracción de la luz en comparación con un eje solidario a dos ruedas que entra oblicuamente a la interfase entre dos medios. Al entrar en el medio más denso la rueda que lo encuentra rueda más lenta y el ángulo bajo el que el frente incide en el medio se modifica. El error más común (incluso en textos) es buscar una relación entre la densidad y desviación del ángulo, cuando es en realidad el concepto de densidad óptica el que hay que considerar. Sin embargo la analogía tiene para él también aspectos positivos: por ejemplo, para la enseñanza pueden aplicarse las analogías históricas ya probadas, y como herramienta de investigación puede llevar a hipótesis nuevas que sean testables según la acepción de Popper.

Anastasio Raftopoulos (2005) recupera la estrategia de Newton de aplicar el modelo de la óptica de rayos al tratamiento de las imágenes, lo que le permite no definirse por ninguno de los dos modelos (corpuscular u ondulatorio). La utilidad de elegir esta estrategia no es sólo instrumentalista sino que al introducir a los alumnos en modelos de complejidad creciente, se inician ya en el método de trabajo de los científicos de ejemplificar la coexistencia provechosa de los modelos de complejidad creciente y ayuda además a que esta progresión coincida con la estrategia constructivista de establecer los marcos propios del conocimiento. El modelo explica la propagación rectilínea de la luz y el hecho de que de cada punto del objeto emanan infinitud de rayos. Aplicado a la práctica docente, se pueden tratar con este modelo las regularidades básicas como reflexión y refracción, y a continuación los alumnos pueden iniciarse en los fenómenos más complejos como las interferencias, difracción y polarización.

El autor Cristos Dedes (2005), recoge de nuevo el discurso de que el conocimiento del paralelismo entre las sucesivas concepciones históricas de la luz y la visión con las de los alumnos, constituye un gran banco de ideas para mejorar la docencia de estos tópicos, el diseño de materiales y para mejorar las investigaciones didácticas. Tras profundizar en las similitudes entre los estadios infantiles y las concepciones de la ciencia primitiva, que atribuyen a una gnoseología común basada en la percepción de la experiencia, ambos pensamientos evolucionan hacia la abstracción que trasciende las observaciones no críticas de la realidad. Suponen que la creación de tópicos que favorezcan el contacto con el origen y desarrollo de las ideas inciden en apreciar mejor la metodología científica, mejoran la comprensión de la naturaleza de las teorías científicas, desarrollan la sensibilidad y el interés hacia la ciencia, mejoran las actitudes y confieren al alumno una estructura conceptual que mejoran la comprensión de los fenómenos naturales.

Pavlos Mihos (2005) presenta un interesante estudio en el que incorpora una revisión de la aplicación de las sombras al estudio de algunos problemas como la determinación de la altura de las pirámides (Tales de Mileto), la forma circular de la Tierra durante el análisis de los eclipses, la dirección del Norte Terrestre por la sombra mínima de un palo vertical en el momento del mediodía, la duración del año a partir la trayectoria de la sombra de un *gnomon* durante todo el año y el conocido cálculo del radio terrestre que hizo Eratóstenes en Alejandría de los Tolomeos. Continúa con los perfeccionamientos que Al Hindi y Alhazen añadieron al estudio de la penumbra, y con el análisis de la cámara oscura que más tarde aplica Kepler a la explicación de la infinitud de imágenes de la Luna cuando durante un eclipse, sus partes visibles se proyectaban en el suelo al pasar la luz entre las hojas de los árboles.

La profesora de la Universidad de Orsay, Lawrence Maurine (2005), es de las escasas investigadoras en la didáctica de la óptica física en los niveles de las enseñanzas medias y universitarias. A la vista de los nuevos currículo franceses, retoma la didáctica basada en los paralelismos entre la Historia de la Ciencia y las etapas precientíficas del conocimiento, aunque con críticas matizadas como el hecho de que ni los contextos ni las formas de razonar son los mismos. El conocido argumento de que enseñar ciencia no es sólo enseñar métodos y conceptos sino también una imagen de la misma, le lleva a proponer una enseñanza basada en el uso de utilizar los textos históricos en dos vías: una que sólo le ha inspirado ejercicios y experimentos, y otra que consiste en la lectura de textos y la respuesta a cuestiones implicadas, en hacer predicciones derivadas de esta lectura, o en validar resultados obtenidos por los estudiantes. Estas actividades no sólo superan los viejos conceptos, sino que introducen estrategias didácticas poco utilizadas como son las preguntas y las argumentaciones de los alumnos. Encuentra dos concepciones mecanicistas de la luz: en una la luz viaja en el vacío en forma de corpúsculos y en la otra necesita de un medio material para hacerlo.

Destaca el obstáculo para la docencia del error de la sustancialización de la onda como el que al explicar la propagación de la luz hacia el fondo del mar, expresen que “al incidir, la luz se ralentiza y disminuye su intensidad con la profundidad del agua”. De esta concepción se deriva que sea muy común pensar que la velocidad de la propagación disminuye con la densidad del medio. Otro error muy persistente es el uso de los modelos geométricos a la hora de interpretar problemas que sólo se explican desde el principio de Huygens.

En nuestra revista *La Enseñanza de las Ciencias*, Luis Osuna (2007) acaba de publicar la primera parte de una experiencia en la didáctica de la óptica geométrica que solapa en parte con la que presento. Al igual que en otras experiencias, relatando el paralelismo entre los errores históricos y los estadios cognitivos, comete a su vez un error en la interpretación del pensamiento de Alhazen achacándole que éste interpreta que de cada punto del objeto sólo se emite un rayo, cuando del texto original y de la interpretación de Lindberg se desprende que el teórico de la cámara oscura y del tratamiento de las sombras y penumbras, ya conocía suficientemente el cono visual que emana de cada punto. Continúa con un análisis epistemológico de los temas de la óptica, con la detección de los preconceptos (visión holística de la imagen, modelo extromisivo de la visión, la concepción estática de la luz ambiente, etc) como obstáculos para el aprendizaje del modelo de la Óptica de Kepler. Para la superación de éstos, planifica la enseñanza y el aprendizaje para alumnos de 16-18 años basándola en problemas sobre cuya resolución el alumno construye sus teorías correctas. A tal fin, parte de las cuestiones ¿cómo vemos? ¿cómo podemos mejorar? y a partir de ahí analiza la formación de la imagen óptica, la diferencia entre focos de luz emisores y reflectores, el papel de la luz y el

comportamiento del ojo en la percepción de la imagen. Concluye que varios errores persisten tras la instrucción por lo que habría que refinar los programas guía confeccionados al efecto.

Nuevamente, Cecile de Hosson (2007), relata la persistencia de errores, el papel de la luz en la visión o en la formación de imágenes ópticas hasta las etapas universitarias a pesar de que el alumno sea de un nivel alto, para cuya superación propone el uso de la historia de la ciencia como estrategia didáctica y como ejemplificación relata la escenificación de unos relatos al más puro estilo de los de Salviati y Sagredo como estrategia para ayudar en la motivación y argumentación en la defensa de las ideas científicas. Recuerdan la creciente importancia de la historia de la ciencia en los currículum y las recomendaciones constructivistas que la proponen. Incluye como argumentos que puede ser un antídoto contra el excesivo determinismo en el pensamiento de algunos alumnos y que los errores históricos pueden ayudar en la selección de actividades y en los ritmos. Renovando el mensaje de su tesis, propone la representación de un drama basado en la visión antigua como estrategia de aprendizaje.

La experiencia más reciente publicada por un profesor de la Universidad argentina de Córdoba (Iparraguirre, 2007) argumenta la necesidad de una enseñanza activa en las enseñanzas medias para el dominio de los problemas reales. Coincide con la mayoría de los investigadores en la dificultad que supone para los alumnos desentrañar el papel que tiene la reflexión difusa en la iluminación indirecta y la subsiguiente observación de imágenes. Reivindicando el papel formativo que los casos históricos de historia de la ciencia, propone varias etapas en el desarrollo de la acción: un inicio con relatos criticados de casos históricos, propuesta de resolución de casos de reflexión y refracción iniciados con el modelo de la óptica geométrica y seguidos por el de onda, el ondulatorio, interpretación de las experiencias de reflexión y refracción a la luz de los modelos de rayos y de frentes. Continúa describiendo las etapas hasta el redescubrimiento experimental de la ley de Snell, mediante el volcado de las medidas de los ángulos de incidencia y refracción, y finaliza proponiendo la metodología de formación de imágenes con lentes delgadas (elude la construcción con espejos curvos por considerarla más difícil), incluyendo el papel del ojo como instrumento óptico.

De la revisión anterior, resumo las conclusiones más destacables que me guiaron en parte para centrar mi investigación:

- La dificultad de los alumnos para interpretar la difusión ambiental, que interprete la luminosidad ambiental aún en días nublados.
- La persistencia de la concepción aristotélica de la transparencia del aire en presencia del sol.

- La dificultad en la interpretación de imágenes reales y virtuales proporcionada por dispositivos ópticos
- La confusión general en diferenciar las observaciones que da un sistema óptico de la observación de la imagen a ojo desnudo de la recogida en una pantalla.
- La necesidad de acentuar las interacciones del alumno con casos reales de aplicación de los conceptos básicos para que sean operativos en su interpretación del mundo de las imágenes.
- La ayuda considerable que los recursos experimentales y el software de simulación proporcionan para la adquisición de los conceptos.
- La conveniencia de elaborar los propios materiales históricos
- La utilidad que la historia de la ciencia proporciona para el desarrollo de nuevas capacidades de los alumnos como son la argumentación y la búsqueda crítica de documentación.
- La práctica inexistencia de ideas previas en los fenómenos de la física ondulatoria como la interferencia, difracción y polarización. En las indagaciones que he realizado sobre estos tópicos, no aparecen construcciones previas comunes, sino errores no sistematizados frente a una situación nueva, fruto de la inmadurez, la carencia de modelos, y como mucho, el intento de establecer analogías poco maduras con otros fenómenos más familiares.
- La escasísima bibliografía en investigaciones sobre ondas, y óptica física .

1.9 El modelo aplicado

Tras veinticinco años de docencia en las EE MM y una gestión docente aceptable según opiniones externas, mi modelo estaba relativamente bien asentado en la optimización de la interacción con el alumno conseguida a base de diálogos exhaustivos, profusión de experiencias de laboratorio, realización de ejercicios numéricos presentados con un ritmo amoldado a la asimilación del alumno, relatos históricos y unas explicaciones que procuraban en todo momento la aproximación al mecanismo de comprensión y al lenguaje del alumno . Era un modelo tecnocrático y también intuitivo (Beltrán, 2005) en la búsqueda de resultados objetivos, en cuanto que suponía que un clima de diálogo favorece tanto el acercamiento del alumno a las consultas como las intervenciones públicas, que aún practico en buena medida, en el que buscaba, además, la atención básica de las facetas humanistas a las que nuestros antiguos docentes no prestaban demasiada atención.

La aparición en la década de los ochenta de la literatura constructivista, supuso para mí una adhesión incondicional inicial que tras el creciente fracaso escolar de la LOGSE, se tornó crítica. Desde entonces, mantengo la personalización del aprendizaje, el hecho de que el alumno construya sus esquemas, el énfasis en la necesidad de la experimentación enmarcada en modelos de conocimiento y el emplazamiento de los conceptos en su contexto histórico, pero desde mi experiencia personal, disiento de la metodología de los programas-guía en los cursos de Bachillerato en tanto no cambien los programas oficiales, pues suponen un exceso de tiempo durante el que muchos estudiantes se pierden, aparte de que en estas etapas evolutivas del alumno, es posible una enseñanza eficaz manteniendo muchas metodologías tradicionales.

Asumo como referencia más respetada la del profesor Michael R. Matthews que se ha mostrado erudito, globalizador de los saberes, crítico selectivo con el constructivismo, partidario de la reproducción de los experimentos históricos y capaz de integrar las dimensiones epistemológica e histórica en los aprendizajes. Fruto ecléctico de los modelos consultados y de mis propias consideraciones, mi propuesta se centra en las siguientes ideas:

- La necesidad de conocer tanto los preconceptos como las habilidades, ritmos de aprendizaje, motivaciones, actitudes e inquietudes iniciales del alumno.
- La conveniencia de una programación inicial en el desarrollo de cada sesión, que evite la aparición de períodos muertos en el desarrollo de los temas.
- El énfasis en la comprensión cualitativa de los fenómenos, y, siempre que sea posible, visualizarlos en la realidad.
- La exigencia de una sólida formación académica y didáctica de los docentes vinculada a la dimensión práctica (no siempre existente) para la aplicación de los conceptos a la resolución de problemas concretos.
- La atención a los objetivos clásicos tales como la resolución de ejercicios y cuestiones, y la adquisición de un lenguaje científico subyacente a los fenómenos naturales.
- Procurar el énfasis en la empatía con la física. desde el conocimiento de las ideas y las historias de sus protagonistas.
- Procurar la personalización del aprendizaje con todos los mecanismos de que disponga el docente: desde las preguntas individuales, hasta los trabajos de casa, informes individuales y control frecuente del cuaderno del alumno.
- Complementar la instrucción individual con trabajos de grupo que inicien el desarrollo de las capacidades de expresión y argumentación.
- Potenciar la dimensión visual del aprendizaje, desde la opinión de que una imagen bien expuesta acelera con frecuencia el aprendizaje respecto de otras exposiciones más

abstractas. Ello pasa por apuntes bien presentados con exigencia de gráficos y figuras, manejo de software, etc.

- La atención urgente al desconocimiento casi general de los conceptos básicos de epistemología y sociología de la ciencia registrado en varios centros de la Comunidad de Madrid (lo que me permite extrapolarlo a la generalidad de los mismos), concretada en la exposición de los conceptos básicos seguidos de la discusión de experiencias, analogías, modelos y teorías de la óptica.
- El convencimiento de que la inclusión de los aspectos históricos y epistemológicos proporciona un nivel más ameno, sólido y duradero en la comprensión de la ciencia.
- El convencimiento de que la consideración simultánea de la teoría y la práctica en los *Experimentum Crucis* consigue cabezas mejor entrenadas para enfrentarse a problemas científicos actuales.
- Tras la instrucción del proceso, el alumno debe ser capaz de superar con solvencia los ejercicios de las PAU de la materia.

Complementar estas líneas de actuación con otras específicas para la enseñanza de la óptica:

- Identificar con claridad las manifestaciones cualitativas de los fenómenos de reflexión difusa, formación de imágenes en reflexión y refracción, visión, instrumentos ópticos, óptica meteorológica, aparición de colores, interferencias, difracción y polarización en la vida diaria.
- Corregir la mala aplicación que se hace de la ley de Snell a interfases de separación entre medios distintos con geometrías curvas.
- Identificar el ojo como un elemento más en el análisis de imágenes dadas por instrumentos ópticos convencionales.
- Corregir los errores frecuentes en la construcción e interpretación de las imágenes.
- Identificar el funcionamiento del ojo y sus ametropías.
- Destacar las conexiones entre los modelos geométrico y ondulatorio de la luz así como los límites de ambos modelos.
- Conocer la evolución histórica de las ideas científicas de los protagonistas de óptica.
- Proporcionar situaciones experimentales para casa con lentes, espejos, CD y otros recursos que personalicen el aprendizaje.
- Proponer la elaboración de informes históricos de la óptica documentados que destaquen los sucesivos paradigmas y los argumentos que los apoyan.

La siguiente fase, poner en funcionamiento un proyecto coherente con este marco en una dialéctica entre las ideas orientadoras, los medios disponibles y la realidad de los alumnos de capacidades e intereses continuamente mudables, añadió la consideración y atención de la dimensión individual que convierte con frecuencia en arte nuestro trabajo.

CAPÍTULO 2

EL DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El contexto de la investigación-acción estaba enmarcado por fronteras múltiples: comenzaba en una programación oficial que sí permite cierto margen a la innovación educativa, por los textos de las editoriales, y por una praxis marcada por las recomendaciones de los coordinadores de las PAU de nuestra materia, Física de Bachillerato, que enfocaban la superación de sus objetivos hacia la resolución de ejercicios numéricos y cuestiones de un grado de dificultad razonable, en los que se prima la aplicación numérica y la comprensión básica de los principios físicos del programa. Esta praxis marcaba fundamentalmente las inquietudes de los alumnos, para quienes es recibida con reservas cualquier experiencia docente que les parezca desviarse de este objetivo.

2.1 Enunciado del problema

Aceptadas estas condiciones, a fin de conseguir una programación coherente, el objetivo final de la acción se fijó en la didáctica de los temas de óptica geométrica, ondas mecánicas, óptica física y visión, del programa de 2º BCN desde una perspectiva distinta de las conocidas en nuestro país: aunque los textos actuales cumplen con suficiente dignidad el desarrollo de los conceptos y la ejemplificación de ejercicios numéricos que capacitan al alumno para afrontar con éxito las pruebas de acceso a la Universidad, son escasas las ejemplificaciones que incluyan además algunos rudimentos de epistemología de la ciencia y un conocimiento contextualizado de la evolución histórica de las ideas científicas y sus protagonistas.

De estas actuaciones debería producirse una mejora significativa de la comprensión cualitativa de los conceptos físicos, de las actitudes en la aproximación a la ciencia, y de la perspectiva en la visión del fenómeno científico, sin olvido de una preparación suficiente para superar con éxito las PAU.

A tales fines, el enunciado preciso del problema se estableció como una investigación que pretendía llegar a unos resultados objetivos a través de unos medios (humanos y materiales) guiada por un modelo inicial responsable de las acciones adecuadas. La evaluación del proceso vendría cruzada por el análisis de cuestionarios, de la observación diaria y del análisis de resultados de las pruebas de conocimientos.

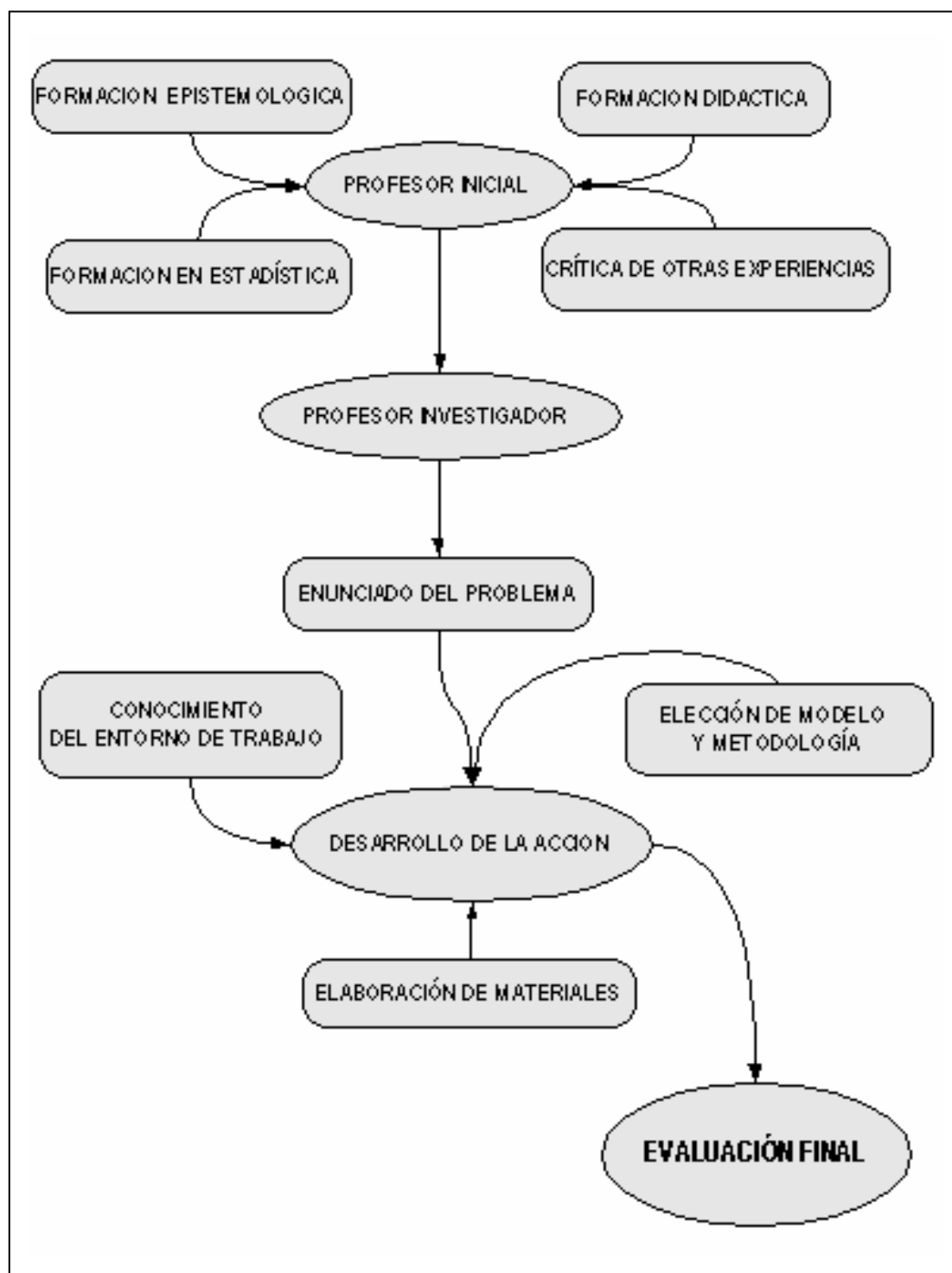
2.2 Secuenciado de las acciones

A fin de desarrollar la investigación-acción, establecí un calendario de actividades:

- Enunciado del modelo de actuación derivado del marco teórico asumido.
- Explicitar la metodología de la investigación: las variables a controlar en el proceso, el cómo actuar y la descripción de los protocolos de medida.
- Conocimiento del entorno inmediato para la acción: legislación oficial, textos escolares de uso frecuente, preconceptos de los alumnos, cuantificación de niveles de conocimientos de partida, experiencias de otros profesores, etc.
- Elaboración de los materiales para el alumno.
- Desarrollar la acción educativa con los alumnos.
- Evaluar los resultados.
- Criticar el contexto y los resultados de la misma.

El cuadro adjunto resume las líneas maestras de un proyecto de actuación que pretende conocer una situación, criticarla y modificarla desde un nuevo modelo. Lo que diferencia las experiencias educativas de otras del mundo experimental, son la diversidad de situaciones iniciales: alumnado, centros, etc. que dificultan el enunciado de principios universales.

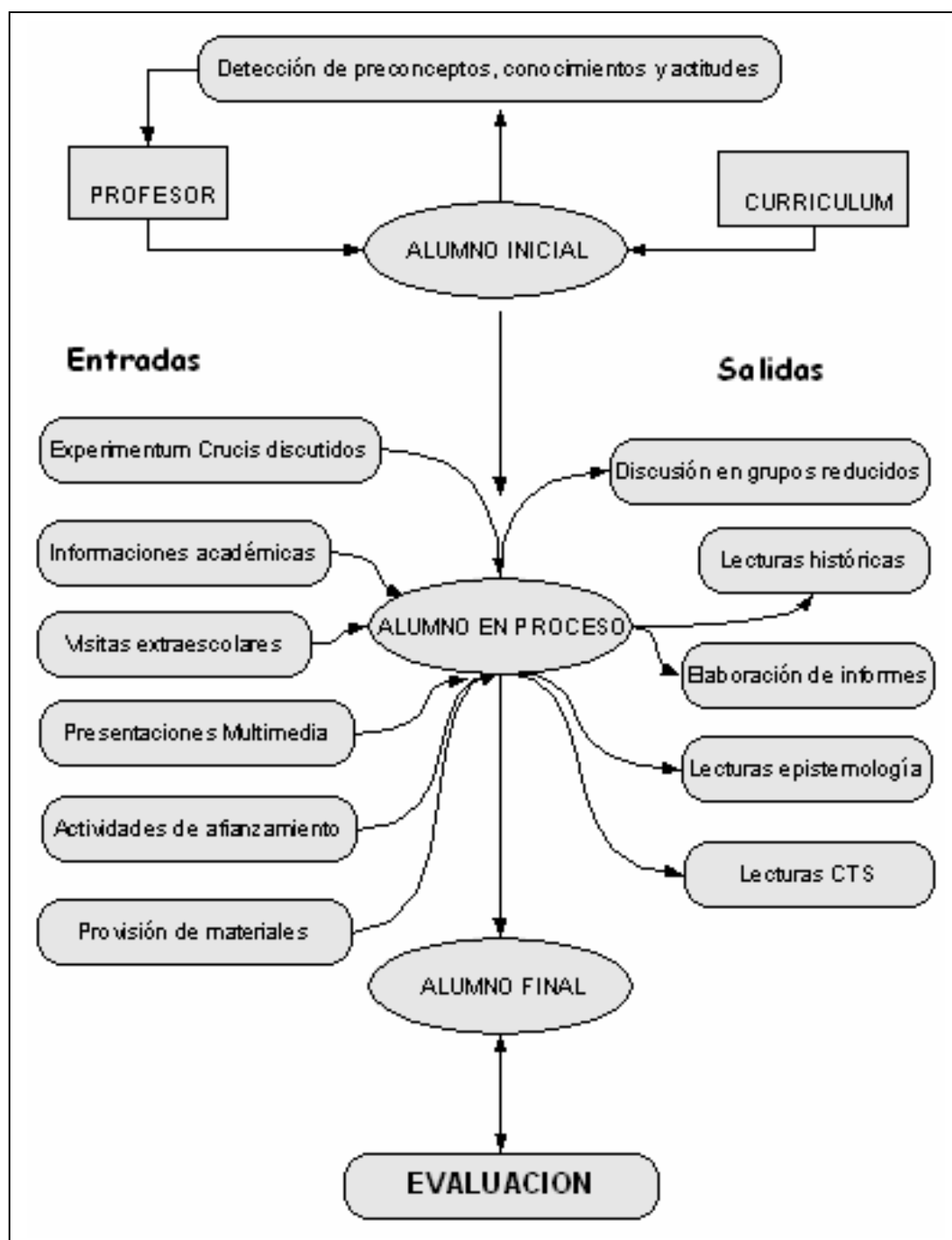
Fig.1:PLANIFICACIÓN INICIAL DE LA INVESTIGACIÓN



2.3 Elección del modelo para las acciones didácticas

En terminología empresarial, la obtención del producto *alumnos ilustrados (output)*, conseguiría a partir de unas actividades iniciales (*input*) guiadas por la hipótesis inicial de que la orientación histórica al ser más integral, consigue mayor interacción.

Fig.2: MODELO INPUT-OUTPUT DE LA ACCION DIDACTICA CON ALUMNOS



La planificación del proyecto pasaba por la identificación de las variables significativas controlables, la definición de la secuencia de actividades pertinentes para el desarrollo de la acción (fig .2) y el análisis de los cambios en el alumno. Aunque mi desacuerdo con la epistemología constructivista del conocimiento es explícito, considero sin embargo acertados los logros de la escuela constructivista del aprendizaje porque el descubrimiento de los preconceptos de los alumnos, de las etapas evolutivas que copiaron sus fundadores del psicólogo Piaget, la dimensión personal del aprendizaje y la necesidad del cambio conceptual son unánimemente aceptados y si han demostrado su utilidad no hay por qué echarlos de lado. Si bien ya he apuntado anteriormente las líneas maestras de mi modelo, su ejemplificación pasaba por las siguientes líneas de actuación:

- Conocimiento previo de lo que ya saben los alumnos. La experiencia profesional, la elaboración de cuestionarios *ad hoc* y la formalización de mapas conceptuales por los alumnos son las principales fuentes para retocar las programaciones iniciales.
- A la manera de un contrato laboral entre dos partes, el alumno debería conocer previamente la programación global del curso, los objetivos que se pretendían durante la exposición de este tema, el calendario de actividades, el material de apoyo complementario a los textos y la forma en que se iban a medir tanto los resultados como el proceso.
- Iniciando en cada nuevo tema una corta introducción audiovisual a los tópicos y protagonistas de los modelos que se proponen.
- Reproducción en el aula de *Experimentum Crucis* de Cátedra posteriores a un guión previo, en los que el profesor relataba en primer lugar el contexto científico y cultural de los personajes implicados, la relevancia del experimento donde implicaba a los alumnos con un diálogo heurístico. A continuación se exponían las estrategias, las medidas, los resultados y las conclusiones.
- Incorporar a la didáctica del tema software educativo utilizable por los alumnos en sus domicilios en versiones *demo*.
- Comentarios de fragmentos de textos históricos originales.
- Sesiones de resolución de ejercicios convencionales.
- Exposiciones magistrales de los contenidos apoyadas con el CD que se les proporcionó a los alumnos.
- Proponer la realización para casa de informes documentados que incluyeran tópicos referidos a epistemología e historia de la ciencia.
- Sesión de recapitulación final.
- Sesiones de evaluación.

2.4. La metodología de la investigación

Los resultados de la acción debían de ser evaluables, una labor difícilmente objetiva. Ello pasaba por enunciar unas variables globales que fueran susceptibles de control y evaluación, y unas herramientas que permitieran estimar su grado de incidencia. Elegí las siguientes:

- La motivación inicial y final:
- Los conocimientos y manejo de algoritmos convencionales,
- La comprensión cualitativa de los conceptos.
- La colección de los preconceptos más frecuentes en Óptica Física.
- El conocimiento que los alumnos tienen de la epistemología de la ciencia.
- El conocimiento del contexto histórica de las ideas científicas de la óptica y de sus protagonistas.

Estas variables debían mejorar a lo largo del proceso si las acciones fueran correctas. Tras dos meses de trabajo y una serie de acciones secuenciadas como eran las exposiciones magistrales ya fueran convencionales o en formato multimedia, las lecturas históricas, la realización de algunos *Experimentum Crucis*, los comentarios de textos antiguos, la resolución de ejercicios numéricos convencionales y otros no tanto, y el desarrollo de informes en casa, era de esperar una mejora sustancial de las citadas variables.

El diseño de la acción fue el ya clásico en las investigaciones educativas: elegido un grupo de alumnos de control (GCON) a cargo de un profesor de reconocida profesionalidad y otro experimental (GEXP) en el que yo impartía la docencia, se trataba de comparar el grado de integración de las variables enunciadas. Tras una supuesta homogeneidad de ambos, la acción didáctica debería traducirse en mejoras significativas susceptible de medición en test posteriores.

La elección de los ítems venía cribada por mi deseo de potenciar la proximidad de los alumnos con su lenguaje (del que sabemos su pobreza) y con la huída deliberada de formalismos matemáticos a favor de detectar la comprensión cualitativa de los fenómenos próximos a sus experiencias inmediatas. Una pregunta indirecta puede en mi opinión detectar filias y fobias que no saldrían a flote de introducirlas linealmente.

La cuantificación de los resultados supuso un problema: aparte de que las muestras eran muy con pequeñas (20 y 12 alumnos respectivamente) para ser estadísticamente representativas, ¿cómo asignar un número preciso a ítems como, por ejemplo, la motivación? Hube de definirlos

a sabiendas de lo imposible de una medida objetiva, contabilizando el número de respuestas positivas (para el criterio del evaluador) y relacionarlas con el número de supuestas respuestas óptimas. Ello me permitía una cierta comparación entre ambos grupos, de otro modo poco viable.

2.5 Los materiales de análisis

A la hora de medir la interacción conseguida con los alumnos durante todo el proceso, elegí como herramientas la observación de aula, los controles convencionales y los cuestionarios que adjunto (anexo 1). Los datos de la observación y de los controles los recogí en fichas tradicionales. Elaboré los cuestionarios para los dos colectivos. El combinado de encuestas previas a los profesores y alumnos, unido a las programaciones oficiales a las normas de los coordinadores de Selectividad y las exposiciones de los textos, fueron el material básico para conocer el pensamiento del alumno.

- Alumnos: a fin de medir las variables citadas (motivación, comprensión de conceptos, etc.), conseguí una amplia recolección de respuestas de alumnos al mismo cuestionario inicial comenzando desde 4º de la ESO hasta 2º BCN. Tras su análisis, me limité a pasar el mismo cuestionario posterior a los alumnos de 2º BCN de los grupos de control y experimental. Conocedor de otras investigaciones similares, quise contrastar la existencia de preconceptos comunes entre mis alumnos y los de otros centros y otros ítems. Estas encuestas fueron un elemento importante, pues aunque la fiabilidad de nuestras observaciones de clase suele ser bastante precisa, siempre hay aspectos que la timidez de los alumnos les impide expresar y que sin embargo nos cuentan con más libertad ante cuestionarios individuales. De hecho, en los temas de motivación y preconceptos extraje conclusiones que no hubiera conocido de no iniciar esta experiencia.
- Profesores: Conocer las opiniones y experiencias del profesorado era otra cuestión a menudo olvidada que sin embargo tampoco era fácil: de un lado conseguir un número mínimo de compañeros que quisieran cooperar, de otro seleccionar preguntas pertinentes para la investigación así como interpretar las posibles contradicciones de los cuestionarios, requirió un tiempo considerable. Conocedor de las servidumbres que la Selectividad conlleva, enuncié casi todas ellas en el tiempo gramatical condicional: “de no tener la Selectividad, ¿que harías en el caso de que...?”

CAPÍTULO 3

EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 El contexto legislativo

El margen de actuación venía limitado por condiciones externas al alumno (los programas oficiales, los textos y los profesores), e internas, como son los conocimientos y actitudes previas, y las etapas cognitivas que marca la psicología evolutiva. Procedía pues un análisis previo de estos factores antes de tomar las decisiones en la elaboración de los materiales, las programaciones y las acciones didácticas.

La normativa actual en vigencia hasta que se implante la LOE, es la definida inicialmente en la LOCE por el MEC en el RD RD 938/2001, 3 de agosto 2001 y, en particular para la Comunidad de Madrid en el DECRETO 47/2002, de 21 de marzo, por el que se establece el currículo del Bachillerato .

Las recomendaciones de los programas actuales en vigencia demuestran una actualización en la didáctica de la materia más amplia que la de la mayoría de los textos consultados, que las instrucciones de los coordinadores de Selectividad, y de la práctica docente de la mayoría de los profesores. Se apuesta en ellas por una concepción constructivista del aprendizaje de la Ciencia donde se propone que el profesor anime el proceso de adquisición de conocimientos puesto que es el alumno quien construye su conocimiento. La epistemología de la Ciencia se recomienda claramente al proponer que se expliquen los métodos de actividad científica o se desmenucen términos epistemológicos como teoría, modelo e hipótesis, como paso previo a su ejemplificación.

La Historia de la Ciencia también está presente de modo explícito cuando se recomienda:

...También requiere incluir diferentes situaciones específicas de especial trascendencia científica, así como conocer el perfil científico de los principales investigadores que propiciaron la evolución y desarrollo de la Física. Todo lo anterior debiera complementarse con lecturas divulgativas que animaran a los alumnos a participar en los debates que sobre temas científicos se pudieran organizar en clase. La realización de experiencias de laboratorio pondrá al alumno frente al desarrollo real del método científico, le proporcionará

3.2 El contexto de las editoriales

Las instrucciones oficiales llegan al mundo editorial que las responde de modo muy diverso. Mientras que en países de nuestro entorno la gratuidad de los libros reduce mucho su componente empresarial, en el nuestro asistimos a una proliferación excesiva que nubla mucho las decisiones de quienes los usan.

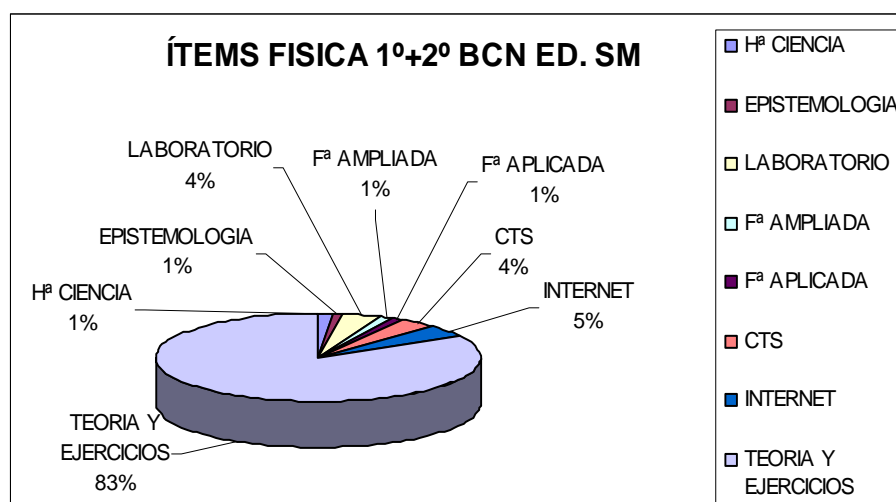
Tras un detenido análisis concluí que los textos que aparecen en el mercado nacional, cumplen dignamente su prioridad de preparar para las pruebas de Selectividad e incluso añaden, con peso específico variable, contenidos relacionados con la Historia de la Ciencia, Epistemología, relaciones CTS, prácticas experimentales, imágenes (Pintó & Ametller, 2002; Soler, 2002), etc...que, si bien vienen incluidos en los programas oficiales de las distintas Comunidades no se han exigido hasta ahora en las respectivas PAU. La condición de impartir un programa apretado en un curso escolar más duro que los precedentes, da lugar a textos demasiado densos con una extensión inferior a veces a las trescientas páginas en los que la lógica comercial da lugar a que los contenidos mencionados aparezcan como algo accesorio.

Como sabemos, son los textos los que en su mayor medida ejemplifican la puesta en práctica de los currículum, y muestran lo que en el mejor de los casos saben nuestros alumnos al final de su andadura en el Bachillerato. Un mejor seguimiento del proceso, me llevó a analizar los contenidos de Física de 1º BCN y de 2º BCN elegidos entre seis textos de los más conocidos. Si bien existe una amplia literatura acerca de las taxonomías de las actividades (Jiménez, 2001) e imágenes en los textos (Perales, 1997; 2006) e incluso de los errores e imprecisiones que contienen (Campanario, 2003) preferí una taxonomía basada en el análisis cuantitativo de los espacios que ocupa en ellos cada categoría de actividades, pues ello me ilustraba mejor acerca de las distintas concepciones de los autores en la didáctica de la materia en oposición a mi propuesta. A efectos de normalizar su clasificación decidí establecer sólo ocho categorías de actividades: Historia de la Ciencia, Epistemología, Experiencias de laboratorio, Física avanzada, Física aplicada, CTS, Uso de Internet, Teoría y Ejercicios. El núcleo de todos los libros consultados es el desarrollo de las cuestiones teóricas y de ejercicios resueltos muy similares a los de los primeros textos universitarios seguidos de la propuesta de resolución de ejercicios y cuestiones. El esfuerzo para reforzar la comprensión y la funcionalidad de los conceptos, aparece en actividades paralelas clasificadas como Ciencia-Tecnología-Sociedad, Prácticas de Laboratorio, Ciencia e Historia, Ciencia básica, etc. He eludido el análisis de las ilustraciones, factor aparentemente

trivial, que critican varias investigaciones didácticas: según algunos (Perales, 2002) los gráficos pueden ayudar a la motivación e incluso a la sustitución de experiencias de laboratorio. A continuación expongo un análisis superficial de los mismos como ejercicio de ejemplificación y crítica, a la óptica de las tesis histórico- experimentales que defiende este trabajo. No obstante, la crítica correcta de un texto sólo viene tras su manejo exhaustivo, consultada la colección de ejercicios y actividades y el desarrollo de las cuestiones teóricas. Con fecha de Junio del 2006, los textos en vigor de las editoriales mencionadas eran los siguientes:

TEXTO SM (ISBN 1º 84-348-8368-6 ISBN 2º 84-348-7708-2)

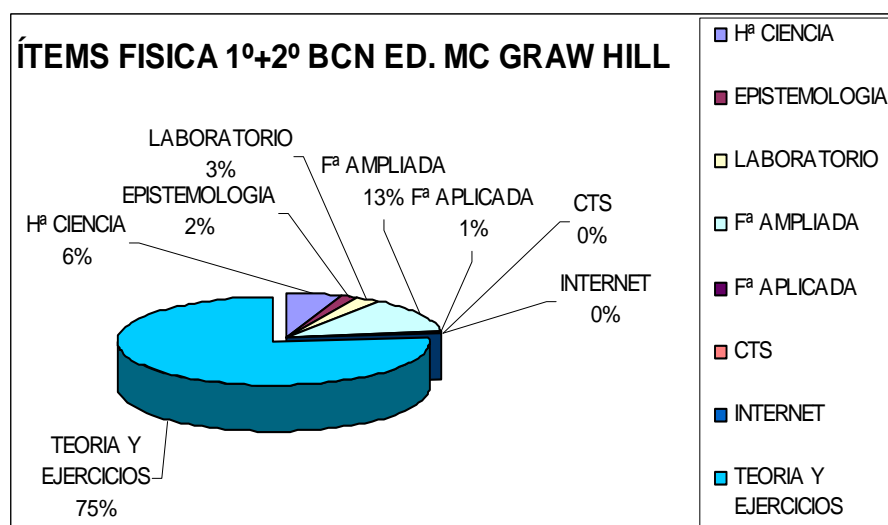
Atiende la epistemología en un capítulo inicial en 1º BCN (Agustench, 2004) dedicado a explicar conceptos básicos: leyes físicas, principios, hipótesis , modelos, teoría científica, etc. Aunque muy breve los desarrollos son correctos. Su estructura de una página por cuestión y lo acertado de sus esquemas, favorece mucho la claridad de las explicaciones. Descuida bastante los aspectos históricos y las experiencias prácticas. Otro acierto lo constituye la sección dedicada a páginas Web relacionadas con el tema de cada capítulo. El tema de Óptica de rayos en 2º (Puente, 2001) viene con mucha claridad, nivel suficiente y profusión de imágenes. Sin embargo la Visión tiene un tratamiento muy deficiente. La Óptica física se trata sólo a un nivel cualitativo muy superficial.



TEXTO McGraw Hill (ISBN 1º BCN 84-481-1702-6 ISBN 2º BCN 84-481-1420-5)

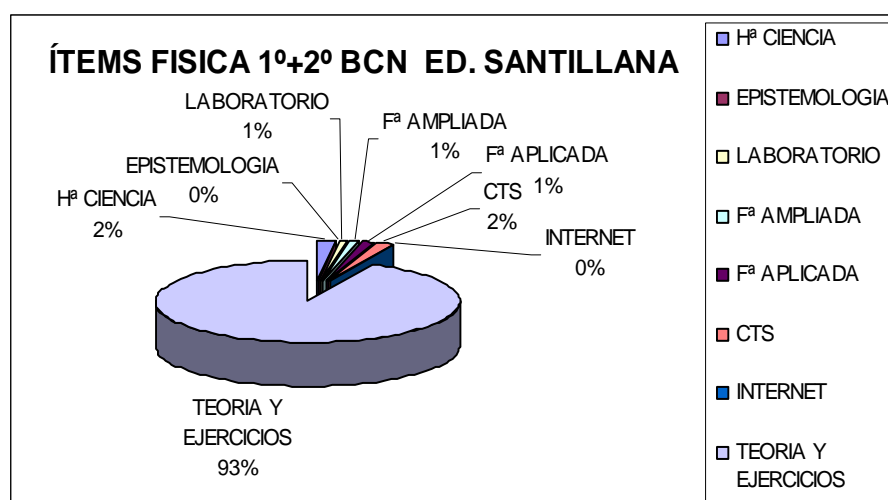
Lo considero un libro experimental (Benedí y otros, 1996) mezcla de estilos distintos. Los autores han apostado por un nivel claramente universitario que destaca aún más en sus secciones dedicadas a física ampliada que pueden iniciar vocaciones. Los desarrollos históricos son exhaustivos en algún tema como el capítulo inicial que resume brevemente las etapas de la física desde los

griegos la gravitación pero inexistente en otros como la óptica. Muchos de los conceptos tienen un desarrollo breve y elevado para esta etapa.



TEXTO SANTILLANA ISBN 1º ISBN 2º 82-294-4574-9

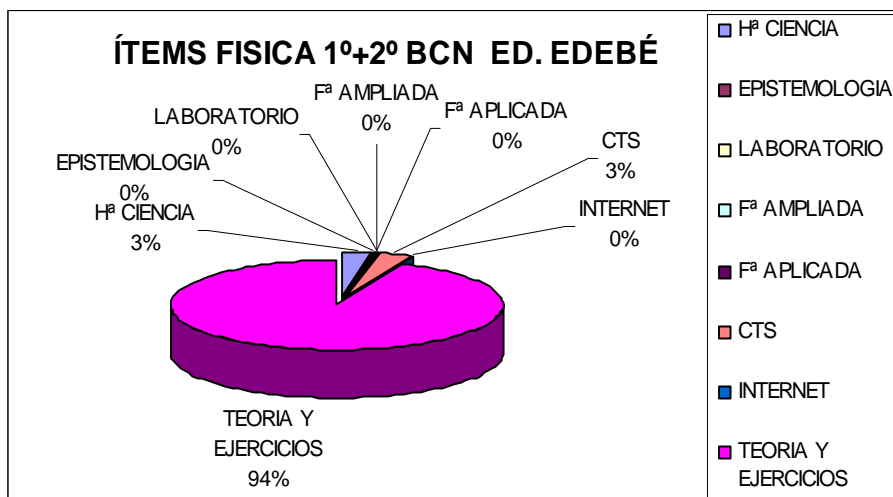
Considero que prima los aspectos puramente utilitarios como se deduce de los pesos relativos dedicados a las actividades no evaluables en Selectividad (Carrascosa,2002; Martín, 1997;).



TEXTO EDEBÉ (ISBN 1º 84-236-6168-7 ISBN 2º 84-236-6539-9)

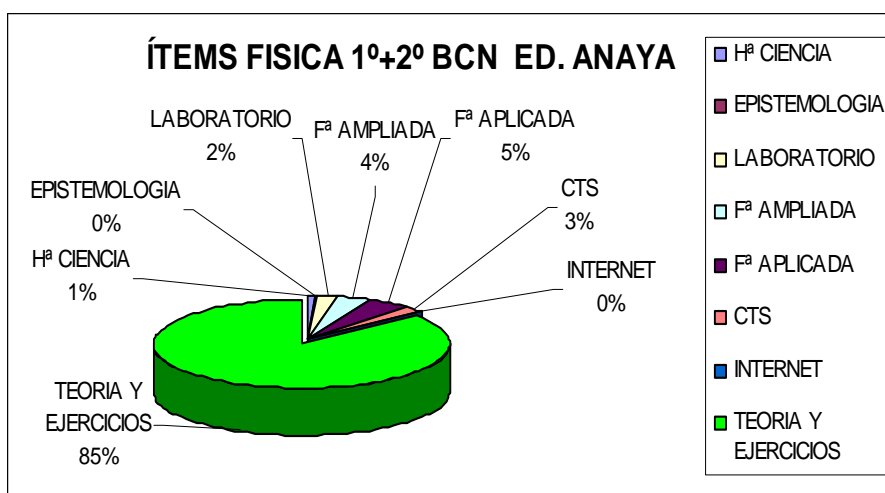
La línea general de la exposición es muy dispersa (García, 1998; Armero, 1999). Recuerda en cierto modo el estilo de las academias que recuperan a los alumnos suspensos, con profusión de actividades del tipo *recuerda, repaso de conceptos, resúmenes de fórmulas* (sin desarrollo previo), *ideas clave...* No hay prácticas de laboratorio propuestas.

En el tema de óptica los desarrollos son convencionales intercalados con notas panorámicas de historia. Los aparatos ópticos con pocos gráficos. Las medidas de la velocidad de la luz por Roemer y Fizeau las explica con claridad.



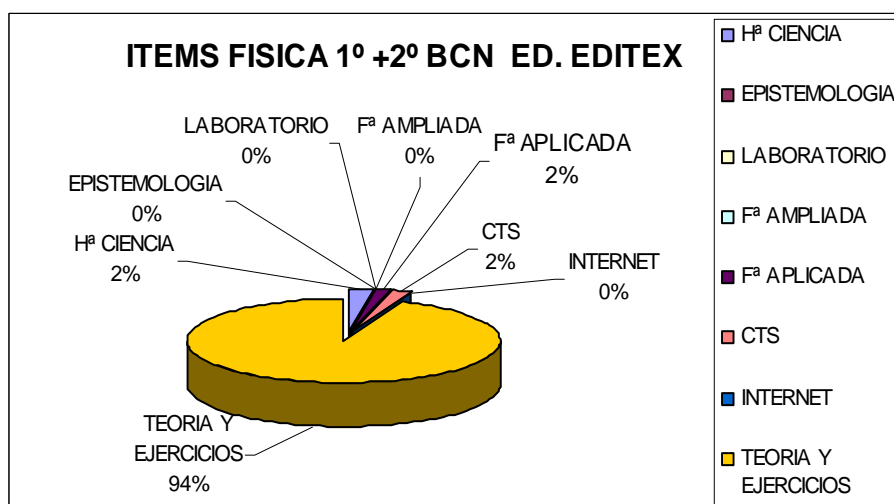
TEXTO ANAYA ISBN 1º ISBN 2º

Se estructura en una presentación lineal de los conceptos y desarrollos de cada tema (Satoca, 1997; 1998). Al final del capítulo se adjuntan secciones dedicadas a : Ciencia aplicada, Ciencia, tecnología sociedad, Ciencia e historia, Ciencia historia y sociedad, Fronteras del conocimiento, Problemas resueltos y Experiencias de laboratorio.



Destaca lo abigarrado de la presentación se hace difícil el autoaprendizaje de los conceptos (Andrés, 2000; 2002). El esfuerzo didáctico se nota en detalles como el enunciado de objetivos al alumno.

La dimensión histórica de la óptica está suficientemente tratada, aunque insista en una visión puramente enciclopédica de la misma que no comparto. La expone en informaciones en columnas paralelas. Inicia antecedentes históricos y concluye con un apartado final dedicado al Laser.



Un juicio de los textos citados, en tanto se mantenga el sistema de promoción actual de alumnos, debe moverse en el terreno de lo posibilista. Aunque las programaciones de partida de los sistemas educativos son ambiciosas y demuestran la presencia de educadores con preparación didáctica, los textos las plasman en realidades más groseras. La presencia en el mercado de los textos anteriores evidencia que satisfacen a distintos colectivos de docentes. Aunque personalmente prefiera el estilo de Mc Graw Hill, considero que para un alumno medio cuyo fin inmediato es la superación de las PAU y una preparación básica para los estudios ulteriores en las facultades científicas o escuelas de Ingenieros sin olvidar los aspectos complementarios, otra editorial, SM, consigue equilibrar bastante bien la claridad en la exposición de los conceptos, la variedad de actividades y el número de ejercicios resueltos y propuestos.

Quiero insistir en la contradicción de que la práctica docente reproduce con frecuencia los esquemas de las clases universitarias: el profesor a menudo sigue sus propios apuntes de teoría y ejercicios a un ritmo frenético marcado por lo apretado de los programas. No lo hace porque sus materiales sean mejores que los libros del mercado, sino por comodidad personal, y esto no mejora el proceso. El considerable esfuerzo económico que supone para el alumno la adquisición del texto es a menudo un gasto inútil.

Otra cosa es que se evalúe con más profundidad el proceso. Excepto en el caso de Mc Graw, los temas históricos y epistemológicos se tratan como meros relatos en el mejor de los casos, sin su ejemplificación en textos originales, ni sus sucesivos avances y fracasos. Estas lagunas de información unidas a las escasas actividades experimentales, dan lugar a una imagen lineal e inexacta de la Ciencia. El alumno tiene así más dificultad en la comprensión de los conceptos y con frecuencia se desinteresa de los temas científicos en favor de otras opciones.

	SM	ANAYA	EDITEX	EDEBE	MCGRAW	SANTILLANA
Hª CIENCIA	7	6	14	15	33	10
EPISTEMOLOGÍA	7	1	.-	2	10	.-
LABORATORIO	21	14	.-	.-	15	6
FISICA AMPLIADA	5	23	.-	.-	73	6
FISICA PLICADA	7	29	9	2	4	6
CTS	20	16	11	18	2	10
USO DE INTERNET	25	.-	.-		.-	.-
TEORÍA Y EJERCICIOS	448	538	527	530	441	513

3.3 Experiencias de otros profesores.

De cara a la programación de la UD objeto de esta investigación, consideré importante conocer la opinión de los profesores en los aspectos más relacionados con este trabajo. Si bien es cierto que somos un colectivo con titulaciones de origen distintas y adolecemos de falta de una formación de base específica para nuestro trabajo (Acevedo, 1994), al cabo de pocos años de docencia, seamos o no especialistas, conseguimos la suficiente idoneidad para impartir los ítems científicos de la materia con autoridad y emitir juicios críticos sobre su docencia. Cierto es que las presiones inmediatas bloquean en ocasiones nuestras concepciones educativas (Hodson D., 1993) .

Interesado en recabar las opiniones de otros compañeros, conseguí la colaboración de trece compañeros/as docentes de la materia en Institutos de Enseñanza Secundaria en Madrid, Alpedrete, Alcalá de Henares y Soria. La edad media de la muestra docentes excedía de los 45 años, lo que garantizaba la madurez de las opiniones emitidas. Elegí dieciséis preguntas incluidas en siete ítems, escasos pero ilustrativos para iniciar el trabajo.

- Concepciones sobre la enseñanza de la ciencia,
- Concepciones del profesorado sobre la enseñanza de la dimensión social de la ciencia
- Valoración sobre la docencia de historia de la ciencia y su epistemología.
- Categorías de actividades motivadoras
- Incidencia de las actividades históricas en la comprensión de los conceptos.
- Tópicos de óptica más convenientes.
- Tópicos de óptica de difícil comprensión para el estudiante.

A efectos de cuantificar los porcentajes de apoyo a las ideas, definí para cada pregunta un índice de valor que estimaba la aceptación o disconformidad con cada opción. Cuando la pregunta se expresaba como asignar una nota, daba el valor 100 a la nota máxima y al índice.

$$\text{INDICE } n_1 = \text{calificación numérica (s.100)}$$

Cuando lo que se contabiliza era el número de registros favorables a una opción, el índice lo calculé como el porcentaje de respuestas favorables registradas respecto al número óptimo de respuestas

$$\text{INDICE } n_2 = (\text{n}^\circ \text{ de registros positivos} / \text{n}^\circ \text{ de registros óptimos}) \times 100$$

Esta elección suponía que en ocasiones, la calificación global de un mismo ítem, integrado por varias preguntas, apareciera mezclado el promedio de ambos índices. Fue una servidumbre a aceptar en tanto sirviera para cuantificarlo.

Ideas de los profesores sobre la enseñanza de la Ciencia

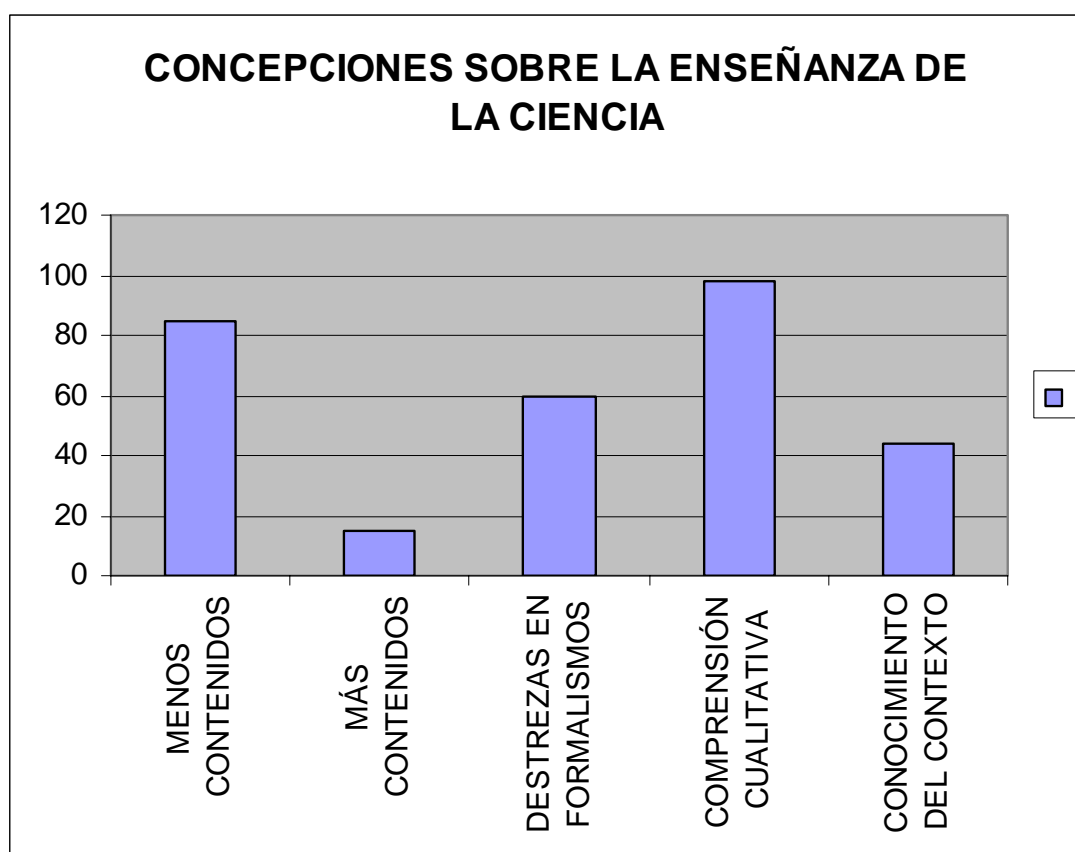
Es un viejo debate si la responsabilidad del fracaso escolar es siempre imputable al alumno, o bien a los programas excesivamente densos. Al menos en nuestra materia pienso que también la segunda opción tiene un peso importante: como nos dicen los buenos alumnos, tras una ESO muy relajada, les hacemos asimilar en dos años de bachiller contenidos parecidos a los de los antiguo Preuniversitario (PREU) y Curso de Orientación Universitaria (COU). El hecho es que mientras a nuestra generación le sobraba tiempo para finalizar e incluso repasar los textos, en la actualidad siempre nos faltan al menos dos meses para cerrar el curso con ciertas garantías. Otra cosa es que las pruebas de Selectividad incluyan tópicos lo suficientemente representativos y esperados como para que las superen un número aceptable de alumnos, y por ello los porcentajes de fracaso no son alarmantes. Tras épocas pasadas en las que la Física era la materia que obtenía peores calificaciones en las PAU, los criterios de los coordinadores han cambiado sensiblemente para bien: en cierta ocasión uno de ellos me expresó casi textualmente, que “si un ejercicio le lleva cierto tiempo de reflexión a un profesor, no debe de ser propuesto a un alumno en una prueba con tanta tensión y tiempo tan ajustado. Las pruebas para el alumno sólo deben ser algoritmos sencillos para el profesor”.

Para comprobar que no era una opinión aislada, incluí dos cuestiones al respecto:

1. Deberíamos enseñar (sin la presión de la Selectividad): más cosas ☐ INDICE = 15, menos, pero de modo más exhaustivo ☐ INDICE = 85
2. Puntúa de 0 a 5 cada ítem: En nuestra estrategia de objetivos a conseguir (sin la presión de la Selectividad), nuestros alumnos deberían: priorizar la consecución de destrezas en desarrollos formales ☐ INDICE = 60. La comprensión cualitativa del fenómeno físico ☐ INDICE = 98 Analizar el contexto sociológico en el que se comprende mejor el nuevo concepto o modelo ☐ INDICE = 44

Las respuestas, que debían considerarse con seriedad por quienes programan las PAU, confirman dos extremos:

- Es mejor que los alumnos aprendan menos cosas de modo exhaustivo que proporcionarles demasiada información no digerida y generadora de confusiones.
- Al futuro ciudadano, ya siga o no estudios científicos, le será más útil iniciarse en la comprensión cualitativa del fenómeno que no en los desarrollos matemáticos. El conocimiento del contexto sociológico tiene para los profesores una menor relevancia.



Concepciones de los docentes acerca de la dimensión social de la ciencia

Nuestra profesionalidad nos ha hecho profesionales muy eficientes en la didáctica de la ciencia, en línea con la que en su día nos enseñaron a su vez. Sin embargo, las condiciones externas y nuestra propia inercia, nos han convertido en meros espectadores de una disfunción evidente: la necesidad de enseñar los fundamentos y los formalismos, hacen muy difícil que el alumno recoja una imagen viva de los impactos sociales o de los recientes adelantos que están revolucionando nuestra cultura. Pienso que la inclusión de la nueva asignatura de la LOE, *Ciencias para el mundo contemporáneo*, nacida sin la servidumbre de los formalismos matemáticos, dará la perspectiva complementaria que de momento falta. Unas breves cuestiones intentaban sondear nuestras opiniones.

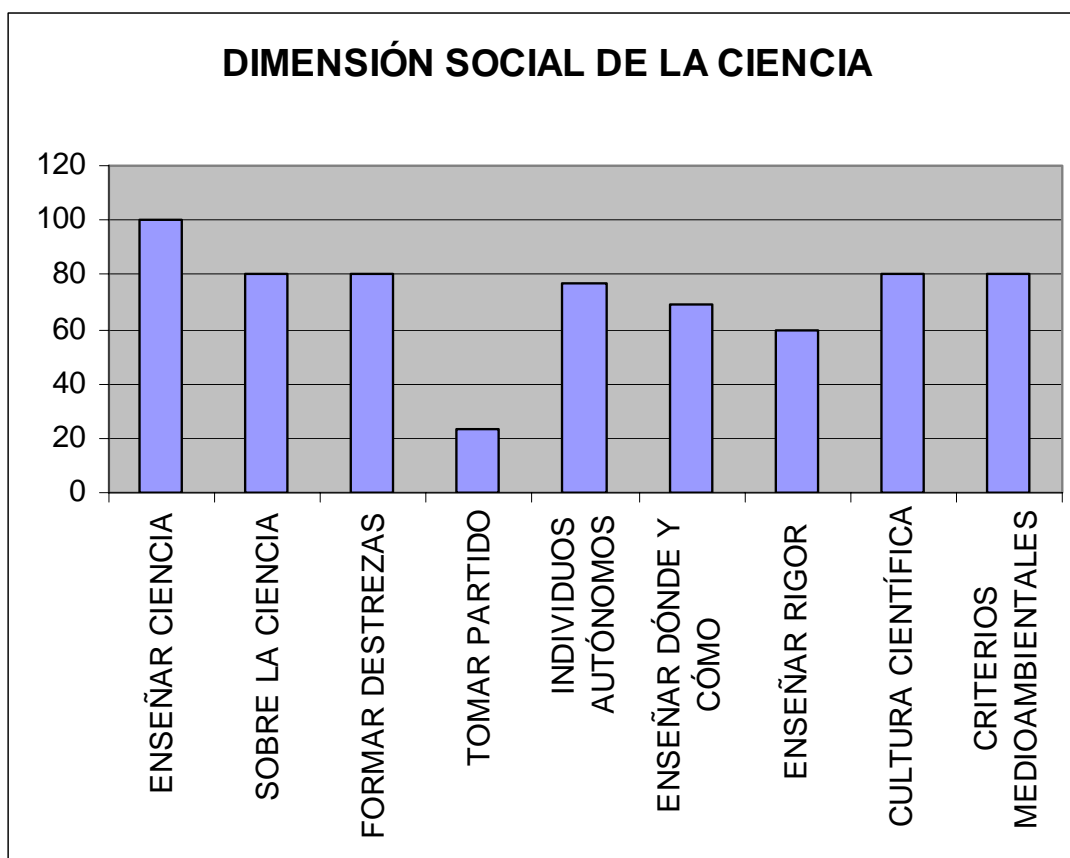
3.-Independientemente de los condicionantes del programa, valora de 0 a 5 la importancia de enseñar ciencia ☐ INDICE =100. Enseñar sobre la ciencia y sus impactos sociales ☐ INDICE = 80. Enseñar destrezas (enfrentarse a problemas nuevos, trabajo en grupo, habilidad experimental) ☐INDICE = 80

4.-La ciencia que enseñamos: debe ser neutra☐ INDICE = 8. Debe tomar partido sobre riesgos y perjuicios de sus contribuciones ☐ INDICE = 23 .Debe dar herramientas al alumno para que tome sus propias conclusiones ☐ INDICE = 77.

5.- Dedicas tiempo a explicar cómo y dónde se hace ciencia : esporádicamente ☐ INDICE = 23 lo justo ☐ INDICE= 8. Siempre que puedo☐ INDICE = 69

6.-Qué puntuación (de 1 a 5) otorgas al poso científico que debiera tener el ciudadano que no ha estudiado una carrera científica ni técnica:
Rigor de razonamiento INDICE = 67 Cultura científica INDICE = 80
Conocimientos básicos que pueda aplicar a la interpretación de fenómenos meteorológicoslo que hacemos o a las reparaciones domésticas INDICE =64 Criterio para decidir en temas ecológicos o energéticos INDICE = 87 .Otros (especificar) INDICE= 80 Otros (especificar)

Las respuestas eran del todo previsibles. No obstante, los índices son en general muy semejantes, lo que presupone que las opiniones no se hayan madurado. En mi opinión habría que filtrar las respuestas vertidas en la tercera pregunta pues en mi dilatada experiencia he detectado en pocas ocasiones una sensibilidad hacia estos temas entre mis compañeros. De las demás respuestas se deduce que los profesores de ciencias no estamos contra una orientación más humanista pero las programaciones nos marcan otras prioridades de conducta y ello probablemente haya configurado una conducta reacia a las innovaciones .Deduzco de ellas una innegable relación con un fenómeno ya tipificado según el cual nuestro comportamiento en la docencia es distinto de lo que pensamos sobre la ciencia (Porlan , 1998). El diagrama adjunto describe el peso relativo de cada respuesta:



La valoración del profesorado por la Epistemología e Historia de la Ciencia

Así como en el caso anterior, nuestras formaciones en estos campos son bastante deficientes. Toda la literatura vertida sobre el constructivismo en estos últimos años, se hubiera aclarado en gran parte de haberlo encuadrado en el objetivo de la vieja polémica filosófica entre realismo e idealismo.

Las preguntas del test indagaban en su conducta al respecto, sus inquietudes para suplir las lagunas de sus conocimientos y sus opciones personales de qué ciencia sería mas aconsejable enseñar, supuestos libres de la presión de Selectividad.

7.- ¿Dedicas tiempo a relatar historias de científicos?

Nunca ☐ INDICE = 8 . A veces ☐ INDICE = 70 .En cada tema ☐ INDICE = 23

8.- Es un hecho que los profesores de física y química carecemos de una formación humanista del fenómeno científico. Si se organizaran cursos de actualización relacionados con la epistemología o historia de la ciencia : Asistiría si estuvieran planificados con rigor ☐ INDICE = 85 . Aunque los considero interesantes, no iría ☐ INDICE = 15 .No los considero interesantes para mi labor ☐

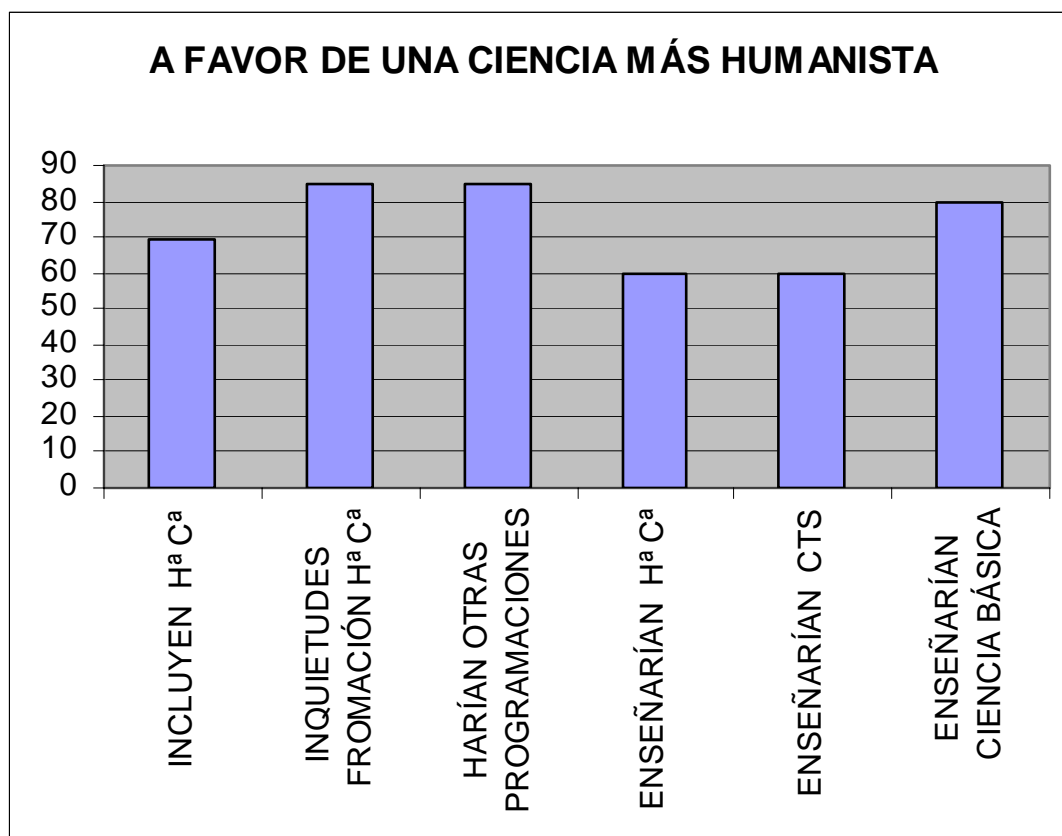
9.-Si tuvieras dicha formación:

Orientaría de otro modo mis unidades didácticas prorizando el cumplimiento de los programas ☐ INDICE = 85. Aún así no lo haría ☐ INDICE = 23.

10.-Da una puntuación de 0 a 5 a que los currículum de física priorizaran (si no tuvieras condicionantes oficiales) : programaciones basadas en la Historia y epistemología de la Ciencia , en el estilo del texto de Holton ☐ .INDICE = 23 programaciones con una clara orientación CTS ☐ INDICE = 23 programaciones con un desarrollo claro de los conceptos científicos al estilo de los clásicos PSSC , CHEM o Nuffield ☐ INDICE = 31 Otras (explícalo)

Las respuestas en las que se acepta la posibilidad de recibir una formación en los aspectos humanísticos y elaborar en sintonía con ellos las consiguientes programaciones, supusieron para mí una sorpresa positiva que detecta que nuestra sensibilidad hacia estos temas está cambiando.

No obstante la opción más conservadora de priorizar la enseñanza de una ciencia básica es la más aceptada lo que no tiene por qué suponer que se descarten las otras opciones asignándoles un menor peso.

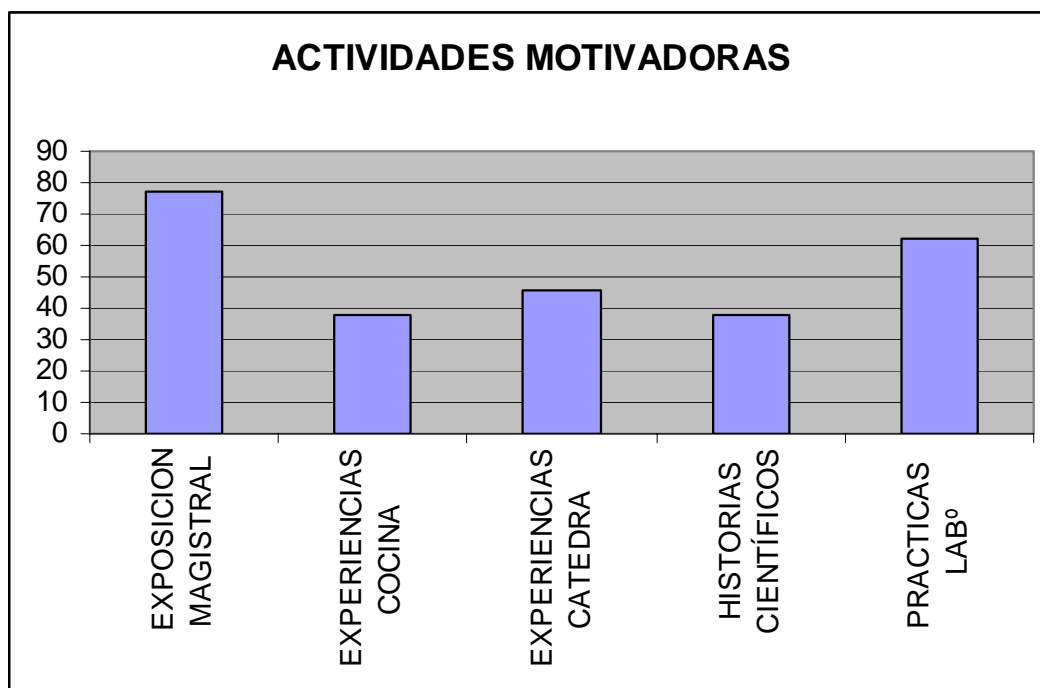


Las actividades más motivadoras

Con vistas a detectar herramientas para optimizar la motivación de los alumnos, elaboré una batería de posibilidades que incluían las variables que podían influir en ella.

11.- ¿Qué estrategias de organización de la clase te son más útiles para la motivación del alumnado? (no tienen por qué ser excluyentes): Exposiciones magistrales muy cuidadas y amenas con espacios para la interacción y la resolución de problemas ☐ INDICE = 77 Informes de laboratorio ☐ INDICE = 8. Pequeñas investigaciones de cocina o taller ☐ INDICE = 38. Las experiencias de cátedra en gran grupo ☐ INDICE = 46. Informes sacados de Internet, libros de divulgación o Enciclopedias ☐ INDICE = 15. Historias de científicos en su contexto social ☐ INDICE = 38. Prácticas de laboratorio ☐ INDICE = 62; Otras (enúncialas)

Nótese que se valora la exposición magistral en primer lugar, seguida de las prácticas de laboratorio. Esta apreciación disiente de la del alumnado que manifiesta su preferencia por las actividades prácticas y extraescolares



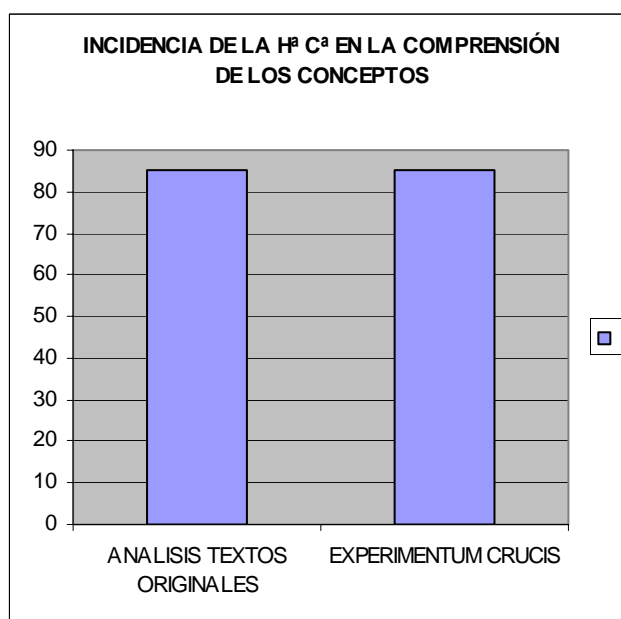
Incidencia de las actividades históricas en la comprensión de los conceptos

Interesado en conocer la opinión de nuestros compañeros en la posible funcionalidad de incluir aspectos históricos, pregunté si, en su opinión, estas actividades podrían ayudar en la comprensión de los tópicos científicos.

12.-La introducción como actividades prácticas del análisis de textos científicos significativos en los temas: me parece que ayudan a la comprensión de los fenómenos ☐ INDICE 85. No le veo rentabilidad para la eficacia en la adquisición de los conceptos ☐ INDICE 15

13.-El incluir experiencias de cátedra o de grupo históricas (los Experimentum Crucis como la descomposición espectral de los colores, etc) dentro de los programas , favorecería la comprensión de los conceptos actuales ☐ INDICE 85 la retrasaría ☐ INDICE 7 no la afectaría ☐ INDICE 8

Lo contundente del resultado me reafirmó en que la historia de la ciencia ejemplificada puede ser, además de un complemento cultural, una gran herramienta para la comprensión de las ideas científicas cuando se describen en cierto detalle.



Los tópicos recomendables de la óptica física

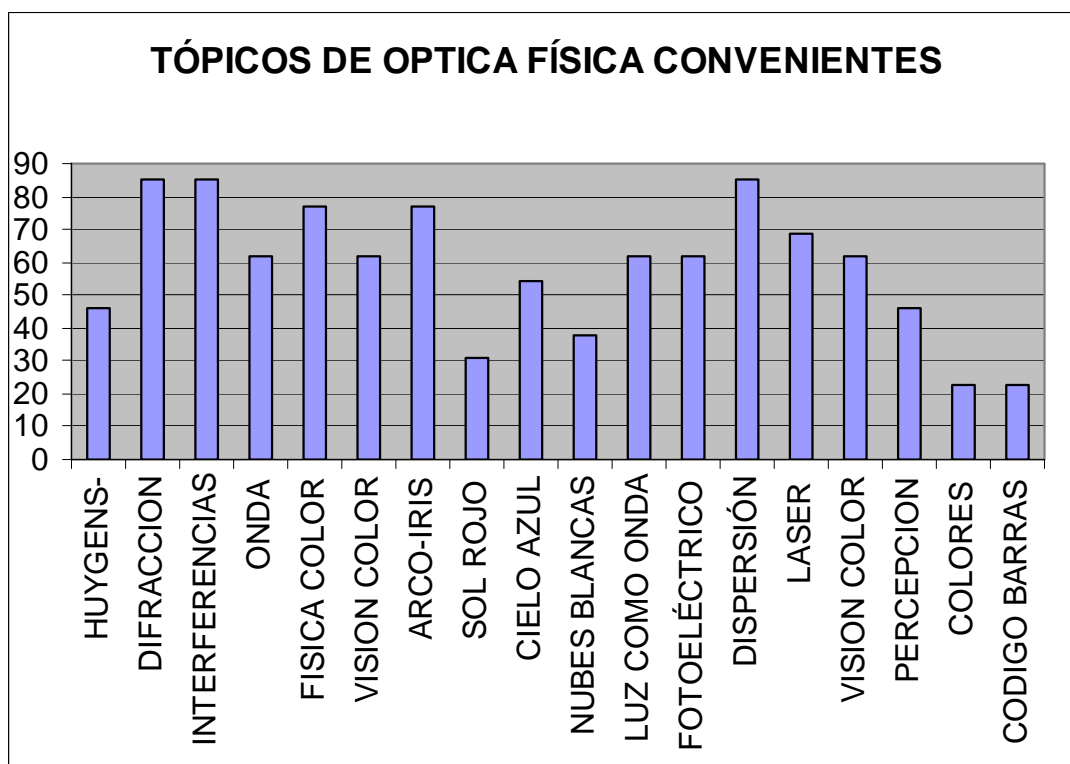
Como apartado más específico del tema, me era importante recabar sus opiniones sobre la relevancia de los ítems, que siendo en general difíciles, deben incluirse en las programaciones.

14.-En tus explicaciones sobre óptica ¿consideras importante considerar a la óptica de rayos como un caso límite del principio de Huygens-Fresnel ? sí ☐ INDICE= 46 no ☐ INDICE = 64

15.-Marca los tópicos cuyo conocimiento cualitativo debería incluirse en una programación convencional de Óptica Física de Enseñanza Secundaria:

Difracción ☐ INDICE = 85. Interferencias luminosas ☐ INDICE = 85 Concepto de onda ☐ INDICE = 62 .Naturaleza física del color ☐ INDICE = 77. Visión del color ☐ INDICE = 62. Comprensión del arco-iris ☐ INDICE =77. Color rojo del sol vespertino ☐ INDICE =31. Color azul del cielo ☐ INDICE =54. Color blanco de las nubes ☐ INDICE =38 . La luz como onda electromagnética ☐ INDICE =77. Efecto fotoeléctrico ☐ INDICE =62 . Dispersión en prismas ☐ INDICE = 85. Laser ☐ INDICE = 69. Visión y sus defectos ☐ INDICE = 62. Efecto fotoeléctrico ☐ NDICE = 62 percepción visual ☐ INDICE = 46 Interferencias cromáticas ☐ INDICE = 23 código de barras ☐ INDICE = 23
☐ INDICE = 46 ; No ☐ INDICE = 54

Los resultados muestran muy buena concordancia con los programas de los textos comunes. Se comprueba también la valoración por los tópicos actuales de la óptica.

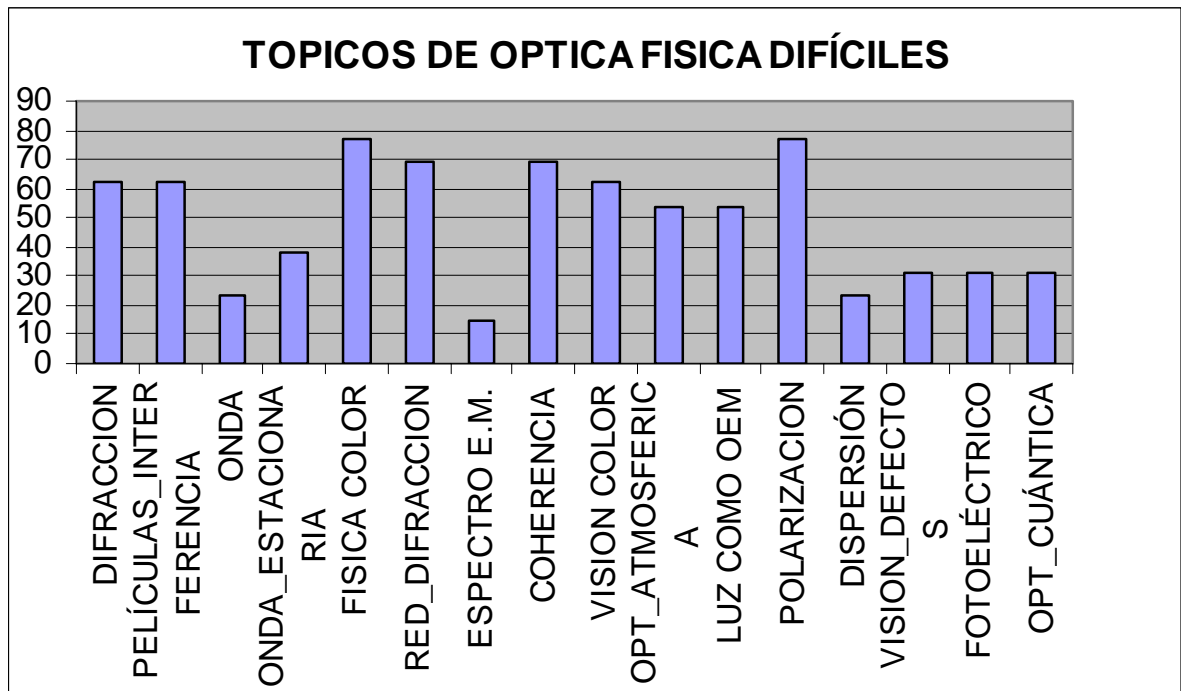


Tópicos de óptica física de comprensión difícil

Tenía la experiencia de que hasta la Universidad, muchos compañeros no tuvimos clara la dimensión física de las ondas aunque supiéramos manejar sus algoritmos sin dificultad. Esperaba el refuerzo de otras opiniones en la selección de los tópicos más difíciles. Merece comentar que hay una gran concordancia entre los tópicos más convenientes y los más difíciles.

16.-De los tópicos siguientes, marca aquéllos en los que nuestros alumnos salen con una comprensión cualitativa confusa al final del Bachillerato

Difracción ☐ INDICE = 62. Interferencias luminosas ☐ INDICE = 62. Concepto de onda ☐ INDICE = 23 Ondas estacionarias ☐ INDICE = 38. Redes de difracción ☐ INDICE = 69 . Espectro electromagnético ☐ INDICE = 15 . Ondas coherentes ☐ INDICE = 69 . Carácter finito de la velocidad de la luz ☐ INDICE = 23 . Naturaleza física del color ☐ INDICE = 38. Visión del color ☐ INDICE = 38 . Óptica atmosférica (arco-iris,...) ☐ INDICE = 54. La luz como onda electromagnética ☐ INDICE = 54 . Polarización de la luz ☐ INDICE = 77 . Dispersión en prismas ☐ INDICE = 23 Visión y sus defectos ☐ INDICE = 31 Efecto fotoeléctrico ☐ INDICE = 31. Óptica cuántica ☐ INDICE = 31 .Otros (especificar)



3.4 Los alumnos antes del proceso

Una vez valoradas las experiencias de los profesores, me interesaba registrar otros aspectos menos tenidos en cuenta a la hora de las programaciones convencionales: conocer los preconceptos científicos de los alumnos de estas edades en el tema de la óptica física, sus opiniones y valoración sobre la dimensión social de la ciencia, sus conocimientos de los protagonistas históricos de la Óptica, y sus explicaciones cualitativas bien fueran ya detectadas en otras investigaciones o en mi experiencia educativa.

A fin de evaluarlos, elaboré un cuestionario común a ambos grupos (ANEXO I) con un doble objetivo: elaborar una colección de ideas previas y medir sus conocimientos y percepciones de los ítems mencionados. Algunas de las preguntas presentadas tenían una respuesta abierta y ello me impedía una cuantificación precisa, dejando a mi experiencia docente estimar su evaluación numérica. En el ánimo de recoger sólo la información más significativa, refundí las respuestas en ocho ítems, dentro de los cuales el peso de cada pregunta tenía distinto peso específico a mi criterio, según su relevancia:

- Percepción Social de la Ciencia (cinco cuestiones): se ha vertido mucha literatura sobre la actual cultura antibelicista, ecologista, etc. que influyen en la mala imagen que de la ciencia tiene el ciudadano medio. Intentaba confirmar la existencia (o no) de estas opiniones en los alumnos jóvenes de nuestra Comunidad.
- Epistemología e Historia de la Ciencia (nueve cuestiones): Ambos ítems configuran junto con el anterior, la parcela humanista de la Física. Aunque bastantes textos de Bachillerato tratan estas cuestiones, no se suelen explicar con detenimiento las diferencias entre modelo, teoría, principios, hipótesis, o leyes físicas. Esta ignorancia se mantiene incluso hasta el final de los estudios de los alumnos ingenieros y licenciados. En estos temas la información que se tiene es muy superficial, siendo responsabilidad de la escasa formación que los profesores tenemos al respecto y de que se tiene la apreciación que sólo se incluyen en el curriculum como un adorno sin demanda en la práctica.
- Naturaleza de la Luz y su Interacción con la Materia: por su extensión, lo subdividí a su vez en dos apartados I y II. El primero se detenía, en diez cuestiones, en el análisis de antiguos temas como el de claridad, oscuridad, colores reales y virtuales y difusión. Buscaba el conocimiento de preconceptos en la interpretación de los fenómenos científicos así como contabilizar aciertos y errores en las interpretaciones cualitativas pertinentes a contenidos tradicionales de

la Óptica. Aunque sabía de su existencia en las cuestiones de Óptica Geométrica, (Driver R., 1989) indagué también si se producía el paralelismo mantenido por algunos teóricos del constructivismo entre los errores históricos y los de los alumnos, en otros aspectos más intuitivos. Era novedoso por ejemplo, buscar en los alumnos la persistencia de las “*eidola*” de Leucipo o de la claridad del medio como una cualidad en potencia que se activa cuando irrumpe una luz en sus proximidades atribuida a Aristóteles, o las sucesivas concepciones del éter o los supuestos colores virtuales que aparecen en las plumas de los pájaros. Un segundo apartado, en dos preguntas, se dedicó a la refracción de la luz en dioptrios de mayor densidad óptica que el aire.

- Ondas de Luz y Materia: Aunque en 2º y 4º de la ESO se inician los rudimentos de las ondas de sonido, es en este curso donde se inician los aspectos ondulatorios de la luz. A sabiendas de su dificultad, propuse la interpretación cualitativa de siete fenómenos en la búsqueda de ideas previas que me sirvieran para una programación más realista.
- Visión y sus Defectos Ópticos: Es un tema muy descuidado pesar de su creciente relevancia para la salud ocular, al que debería atenderse en esta investigación. Tres cuestiones muy sencillas buscaban la interpretación de fenómenos de frecuencia diaria.

Descripción de los grupos y del procesamiento de la información

De acuerdo con los protocolos convencionales, elegí un grupo de control (GCON) y otro experimental (GEXP). Un cuestionario inicial con los ítems mencionados me serviría como referencia de partida de cada grupo. En una situación idónea los niveles de ambos deberían ser similares. Tras la acción didáctica con el GEXP pasaría de nuevo a los dos grupos unos nuevos ítems similares a los iniciales para medir, si las hubiere, diferencias sensibles.

El de Control (GCON), un 2º de Bachiller del IES Alkal'a Nahar de Alcalá de Henares, estaba integrado por 20 alumnos de un cierto estatus social (hijos de profesionales liberales y funcionarios en su mayoría) aunque de un rendimiento académico mediano. La docencia con ellos seguiría las acostumbradas: exposiciones teóricas y resolución de ejercicios tipo Selectividad. El profesorado del Departamento era muy profesional y conservador, aunque no participaba en proyectos de innovación ni experiencias educativas.

Como Grupo Experimental (GEXP), elegí un grupo de 13 alumnos del mismo curso en el IES Gregorio Marañón, de menor status social (hijos de autónomos, asalariados y titulados medios) en el que yo impartía la docencia, situado en el barrio del Pilar de Madrid. A excepción de tres

alumnos, los demás estaban también poco motivados por la ciencia. El profesorado de nuestro departamento ha participado en tres Ferias de Madrid por la Ciencia, Proyecto Globe y una colaboración con un Instituto de Copenhague sobre las figuras europeas de la Revolución Científica. Mi trayectoria docente con un éxito razonable de aprobados en las PAU del distrito de Madrid, durante los últimos quince años ha insistido en desarrollar, además de los contenidos convencionales, los aspectos experimentales e históricos de la física. El desarrollo de la investigación, la didáctica de los temas de ondas y óptica con una duración de tres meses, se haría añadiendo actividades experimentales históricas, presentaciones audiovisuales de los contextos y elaboración de informes de la evolución de las ideas científicas documentados a partir de un CD que se les proporcionaba.

Sabía, dadas las limitaciones de entrada, que debía evitar grandes expectativas de esta investigación-acción: nuestra materia prima son en parte alumnos magníficos, otros menos brillantes, y otros mal orientados y promocionados al nivel que nos ocupa. Casi todos tienen en común el síndrome de la trivialización en su formación: cuando piensan que lo que se les expone no irá a las pruebas de Selectividad, su interés decrece. Para mantenerlo, incluí de forma paralela a los temas convencionales, un trabajo voluntario cuya evaluación se sumaría a los mismos: este trabajo proponía la respuesta a varios ítems de índole histórica, epistemológica y científica documentados con un CD, Internet y las experiencias históricas realizadas en clase. Cada experiencia se acompañaba de un guión que el alumno debía cumplimentar. De la interacción entre las actividades que se proponían y el material humano, se esperaba un progreso sensible en sólo dos meses de trabajo intenso. No era un tema fácil.

Los cuestionarios

Veamos la descripción de los resultados del cuestionario inicial (Anexo I) pasado a los alumnos los primeros días de octubre en ambos grupos:

Percepción social de la Ciencia

En el mundo occidental se está comenzando a satanizar a la ciencia como culpable de desastres bélicos y medioambientales mientras que proliferan como un insulto a la inteligencia las secciones de horóscopos en los medios (protagonizadas por analfabetos en las cartas astrales y astronomía). Tenía interés en saber de sus actitudes y del conocimiento que tenían de la actividad científica.

CUESTIONARIO PERCEPCIÓN SOCIAL DE LA CIENCIA

1.- La investigación científica no militar (responde a una sola opción):

Contribuye a la creación de medios innecesarios ☐ Incide en la degeneración del medio ambiente ☐ Hace una labor social importante ☐

INDICE GCON = 80; ÍNDICE GEXP = 100 . (PESO RELATIVO: 1 pto.)

2.- ¿Crees en los horóscopos? ¿Por qué?

INDICE GCON = 95 ;ÍNDICE GEXP =100. PESO RELATIVO: 0,5 ptos.

3. Pon ejemplos de descubrimientos importantes en este siglo

INDICE GCON = 70; ÍNDICE GEXP = 90 (PESO RELATIVO: 1 pto.)

4. Hasta el siglo pasado, la ciencia era un patrimonio exclusivo del mundo occidental ¿eran nuestros abuelos más inteligentes que las demás razas? ¿había otras razones? GCON = 75 . ÍNDICE GEXP =100 . (PESO RELATIVO : 0,5 pto.)

5. ¿Sería posible que un genio como Newton hubiera progresado de no haber asistido a la Universidad?

INDICE GCON = 0 ÍNDICE GEXP =31. (PESO RELATIVO : 1 pto.)

INDICES GLOBALES: GCON = 59 ; GEXP = 77

RESPUESTAS COMPARADAS

1. A la vista de las respuestas favorables, es extrapolable afirmar que los jóvenes consideran positiva la labor social de la Ciencia y son poco críticos frente a sus inconvenientes.
2. También aquí es unánime la respuesta en contra de la fiabilidad de los horóscopos.
3. Los alumnos tienen un conocimiento suficiente de los descubrimientos clave como el genoma humano, la clonación, células madre, energía nuclear, satélites artificiales, etc. Paradójicamente, a pesar de su menor *status* económico, el GEXP dio más acierto y riqueza en las respuestas.
4. El grupo de control , GCON, expresó dos respuestas con un leve tinte racista mientras que el GEXP fue unánime en desestimar este factor. Los índices de tolerancia son mayoritarios en ambos grupos (Alcalá de Henares tiene algunos grupos xenófobos).
5. En el GCON 15 de 20 alumnos (75%) y en el GEXP 9 de 13 (70%) pensaban erróneamente que quizás Newton podría haber andado sólo su camino aunque con más esfuerzo. Es un malentendido muy común que piensa en el genio brillante aislado en su mundo. A pesar de su genio, un Newton que no hubiera salido de su rural de Woorsthorpe, y disfrutado del estímulo de las academias científicas, no hubiera llegado a las fronteras de la ciencia de su época al no conocer las obras de Descartes, Gassendi o Galileo.... Saqué

de este registro la necesidad de cambiar en los alumnos una opinión tan simplista de la ciencia.

CONCLUSIONES

Nuestros jóvenes bachilleres han sufrido ya una primera selección al final de la ESO y de alguna manera se sienten integrados en el mundo de la cultura científica que será su referencia profesional. Es lógico que los índices muestren de entrada actitudes favorables e ingenuas hacia el progreso científico aunque no lo conozcan con un rigor básico.

Epistemología e Historia de la Ciencia

Sabía por propia experiencia que la mayoría de los docentes tanto de Enseñanza Secundaria como Superior, no consideramos prioritario impartir estos contenidos. Ello aboca a que los estudiantes universitarios de cualquier titulación, tengan un desconocimiento casi general, de, por ejemplo, las diferencias entre modelo y teoría científica, la provisionalidad del conocimiento científico, las biografías de sus protagonistas, y la evolución de las ideas científicas. No es un problema de desconocimiento de un lenguaje, sino el índice que muestra el desconocimiento del fenómeno científico: el mass-media convive con un fenómeno social del que desconoce cómo nace y cómo evoluciona.

Sin embargo, esta ignorancia no se percibe como perjudicial para el progreso puesto que las sucesivas promociones se van incorporando con éxito a las labores científicas, pero su persistencia da lugar a lagunas culturales que los ciudadanos y científicos más críticos echan en falta, unos para asumir una perspectiva social de la Ciencia y otros para la interpretación profunda de las teorías científicas, relatividad del conocimiento, falsacionismo de las teorías, etc..

Las preguntas que propuse querían estimar el conocimiento previo que los alumnos tenían de los protagonistas de la ciencia, de rudimentos de la epistemología y de la valoración que daban a la historia de la Ciencia.

CUESTIONARIO EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

6.- ¿Puedes citar dos ejemplos de teorías científicas definitivamente ciertas?

INDICE GCON = 0 ÍNDICE GEXP = 0. (PESO RELATIVO : 1)

7.- Algunos piensan que la ciencia nunca será capaz de conocer los secretos de la Naturaleza y que basta con proponer teorías que predigan correctamente sucesos futuros sin profundizar en los últimos motivos ¿estás de acuerdo? ¿es importante para el progreso de la ciencia?

INDICE GCON = 0 . ÍNDICE GEXP = 5. (PESO RELATIVO: 1)

8- ¿Qué es un modelo científico?

INDICE GCON = 5 ÍNDICE GEXP = 0. (PESO RELATIVO:1)

9.- ¿Qué diferencia una opinión personal de un informe científico? INDICE GCON = 20
ÍNDICE GEXP = 90. (PESO RELATIVO: 1)

10.-Relaciona las letras de la columna central con los números de las columnas izquierda y derecha. Puede haber varios números para una misma letra, y pueden coincidir los números asignados a las distintas letras.(Ejemplos: a1,a2,a7, b2, b5....)

CIENTÍFICO	RELACIONES	ÍTEMS TEMAS CIENTÍFICOS	
a) Newton		1.visión	14.prismas
c) Galileo		2.muelles	15.polarización
d) Kepler		3.astronomía	16.microscopio
e) Descartes		4.fuerzas	17.arco-iris
f) Maxwell		5.longitud de onda	18.gravedad
g) Young		6.electrones	19.plano inclinado
h) Huygens		7.cuantos de luz	20.colores
i) Bohr		8.ondas de radio	21.interferencia
j) Hooke		9.electromagnetismo	22.difracción
k) Halley		10.reloj de péndulo	23.fotones
l) Copérnico		11.órbitas elípticas	24.- radiactividad
m)Einstein		12.telescopio	
n)M.Curie		13.espectros	

INDICE GCON = 14 ;ÍNDICE GEXP =27. PESO RELATIVO 1.

11.-Pocos científicos actuales tienen tiempo para leer la historia de la ciencia .El conocimiento de las historias de los científicos, ¿puede servirnos de algo a los profanos?: cultura histórica ☐ conocer mejor el proceso científico ☐

INDICE GCON = 52 ;ÍNDICE GEXP = 60. PESO RELATIVO 1.

12.-¿Qué es el éter de los antiguos? (por ejemplo se dice de algo que es *etéreo*, una película reciente se titula *El Quinto Elemento* o Calderón de la Barca en *La Vida es Sueño* habla de las *etéreas salas*....)

INDICE GCON = 45 ;ÍNDICE GEXP = 31. PESO RELATIVO 1.

13.-Te interesa conocer historias de los avances científicos históricos y de sus protagonistas? sí ☐ no ☐

INDICE GCON = 62 ;ÍNDICE GEXP = 100 . PESO RELATIVO 1.

INDICES GLOBALES: GCON =33. GEXP = 39

RESPUESTAS COMPARADAS

6. Ambos grupos admiten tácitamente la certeza de algunas teorías e incluso la ejemplifican en la teoría de Gravitación Universal, el átomo de Bohr, Relatividad, etc. Ninguno expresa la provisionalidad inherente a cualquier teoría científica. El GCON sólo expresa una respuesta acertada mientras que el 69 % del GEXP esbozan un inicio correcto sin mucho convencimiento. Está claro que la responsabilidad de esta desinformación está en los docentes (en los que me incluyo): estamos demasiado acostumbrados a la vía inductiva en la transmisión de la ciencia, dando por hecho que a partir de la experiencia se llega a certezas absolutas y a exigir las en los controles de evaluación. Frente a esta ambigüedad, decidí no contabilizar ninguna respuesta como acertada.
7. La pregunta era demasiado sutil para la edad de los alumnos. Buscaba la influencia de nuestros compañeros filósofos en la vieja polémica entre realismo e idealismo que enuncia la dificultad de conocer lo absoluto con los limitados sentidos de que disponemos. Sólo un alumno del GEXP expresa la provisionalidad del conocimiento sin entrar a fondo en la cuestión.
8. Aquí los resultados fueron de desconocimiento total y ello es cuanto menos paradójico por cuanto la descripción de los *modelo* atómico de Dalton, Rutherford, Bohr, ... se repite durante la ESO y Bachiller. Sólo un alumno del GCON respondió correctamente.
9. La respuesta mayoritaria en ambos grupos es que en el informe científico se *justifica, experimenta y ensaya*, lo que se puede considerar acertado. Tres respuestas del GCON como : *es la verdad para siempre, el informe está contrastado por gente que entiende, o el informe es una verdad tautológica*, expresadas en un tono solemne, pretenden reforzar con un énfasis suplementario lo que no se razona. Es una postura frecuente en la adolescencia.
10. A fin de comparar grupos de poblaciones diferentes, establecí un índice *n* que midiera los aciertos de todos los ítems relativos a cada científico con referencia a las soluciones correctas (no exhaustivas) que ejemplifico en la tabla adjunta:

CIENTÍFICO	ÍTEMS CORRECTOS
a) Newton	(3+4+11+12+13+14+17+ 20)
c) Galileo	(3+4+10+12+18+19)
d) Kepler	(3+11+12)
e) Descartes	(3+12)
f) Maxwell	(1+5+8+9)
g) Young	(1+5+20+21+22)
h) Huygens	(3+5+10+12+15+18)
i) Bohr	(5+7+13+23)
j) Hooke	(2+4+11+16+21)
k) Halley	(3+11+12+18)
l) Copérnico	(3)
m)Einstein	(2+3+6+7+13+18+23)
n)M.Curie	(24)

El cómputo del cociente de las soluciones correctas entre el máximo número de aciertos, permitía homogeneizar el grado relativo de conocimiento de cada científico.

$$n_i = \text{número de aciertos registrados / número óptimo de aciertos}$$

La media de los n_i de todos los científicos daba dos valores $n_{\text{CON}} = 14$ para el GCON y $n_{\text{EXP}} = 27$ para el GEXP. Los científicos más conocidos fueron Newton, Galileo, Hooke y Einstein. Copérnico, Kepler y Mme. Curie son prácticamente desconocidos. Estos índices evidencian que el único conocimiento que se tiene de ellos es el derivado de los enunciados de las cuestiones como leyes de Newton, ley de Hooke, etc. Hay contadas excepciones en las que gracias al profesorado de filosofía, se amplía su conocimiento de personas e ideas.

Se constata que todos los índices están muy lejos de la unidad, pero hay diferencias entre ambos grupos. Las tablas corregidas dieron el resultado inesperado de que el GEXP de menor estatus social pero más urbano, marcaba distancias significativas. Considero alarmantes los ínfimos índices de ambos grupos en los personajes Descartes, Huygens y Young, cuyo protagonismo en los grandes debates fue próximo al de Newton. El grupo experimental da resultados levemente mejores imputables exclusivamente a la insistencia que de estos temas hace el profesorado de mi centro. De hecho, cuando culpamos a los alumnos de incultura, deberíamos recordar que al menos en la parcela científica, es en gran parte la responsabilidad de los profesores de ciencias proveerles, entre otras, de una información básica de las figuras científicas más destacadas.

GRUPO DE CONTROL: 20 ALUMNOS

Científico	Nº aciertos	Nº óptimo de aciertos)	Indice	Ítems temas científicos	
a)Newton	31	160	19	1.visión	14.prismas
b)Galileo	26	120	22	2.muelles	15.polarización
c)Kepler	7	60	13	3.astronomía	16.microscopio
d)Descartes	3	40	8	4.fuerzas	17.arco-iris
e) Maxwell	5	80	6	5.longitud de onda	18.gravedad
f)Young	3	100	3	6.electrones	19.plano inclinado
g)Huygens	2	120	2	7.cuantos de luz	20.colores
h) Bohr	16	80	20	8.ondas de radio	21.interferencia
i) Hooke	14	100	14	9.electromagnetismo	22.difracción
j)Halley	11	80	18	10.reloj de péndulo	23.fotones
k) Copérnico	9	20	45	11.órbitas elípticas	24. radiactividad
l)Einstein	9	140	6	12.telescopio	
m)M.Curie	6	20	5	13.espectros	

GRUPO EXPERIMENTAL: 12 ALUMNOS

Científico	Nº aciertos	Nº óptimo de aciertos)	Indice	Ítems temas científicos	
a) Newton	35	117	30	1.visión	14.prismas
b) Galileo	19	78	24	2.muelles	15.polarización
c) Kepler	11	60	28	3.astronomía	16.microscopio
d) Descartes	1	26	4	4.fuerzas	17.arco-iris
e) Maxwell	8	52	15	5.longitud de onda	18.gravedad
f) Young	21	65	32	6.electrones	19.plano inclinado
g) Huygens	7	78	9	7.cuantos de luz	20.colores
h) Bohr	18	52	35	8.ondas de radio	21.interferencia
i) Hooke	11	65	17	9.electromagnetismo	22.difracción
j) Halley	10	52	19	10.reloj de péndulo	23.fotones
k) Copérnico	6	13	46	11.órbitas elípticas	24. radiactividad
l) Einstein	18	91	20	12.telescopio	
m) M.Curie	10	13	77	13.espectros	

11. Donde esperaba respuestas que marginasen la vigencia de la historia de la ciencia, ambos grupos le conceden mayoritariamente una influencia considerable a su utilidad para el conocimiento del proceso científico.

12. Es sabido que los departamentos de Filosofía, Ciencias de la Naturaleza y Lengua han tratado en más de una ocasión la idea del éter. De este conocimiento pretendía indagar si alguno la relacionaba con la idea de medio propagador de perturbaciones. Las respuestas son en general correctas pero algunas tienen la incoherencia frecuente del alumno que, ante una prueba escrita, piensa más en salir del paso con ambigüedades deliberadas, estorbando el juicio del corrector que intenta adivinar qué quiso decir en realidad el sujeto, que en lo acertado de la respuesta:

Las respuestas del GCON inciden más en el ámbito de la filosofía, influenciados por este Departamento de su centro, como expresan algunas respuestas: *El líquido donde había todo y nada a la vez, un medio en el universo, un elemento más, la vida de cada ser vivo, un material puro del que salen todos los demás, una sustancia infinita...*

En las respuestas del GEXP se nota de nuevo nuestra influencia científico-humanista : *El quinto elemento que forma los planetas,.Es la esencia de las cosas, la quinta esencia de las estrellas. Un medio que permite que llegue la luz. Una sustancia muy ligera omnipresente. La sustancia que forma las estrellas. El elemento que contiene cada cosa. El quinto elemento formado por los demás. La esencia que tiene sus propiedades y controla a los otros...*

Vemos que las respuestas se pueden agrupar en: las que lo consideran como el quinto elemento que integra las estrellas y planetas, como un medio en el espacio que propaga las perturbaciones o como un *Protogono* de la mitología griega.

13. El 62% de los alumnos del GCON y el 100% de los de GEXP estaban interesados en conocer la historia de los científicos. Nuevamente me sorprendió este interés que yo sospechaba bastante menor. Es probable, de acuerdo con algunos autores, que el acercamiento humano de las figuras las haga más familiares y que al dar claves nuevas que expliquen mejor sus trayectorias, aumente la empatía por sus figuras. Mi propia experiencia confirma que si el tratamiento es anecdótico y ocupa poco tiempo, el alumnado es receptivo a estos temas.

CONCLUSIONES

Obtuve la conclusión de que la historia mínima de los científicos es muy poco conocida, aunque las actitudes iniciales (cuando aún no ha comenzado el estrés de la Selectividad) son favorables a informarse de la dimensión histórica de la ciencia. De nuevo sale a relucir la mayor inquietud de nuestro equipo por los temas culturales que se traduce en mejores resultados del GEXP.

La historia de la ciencia interesa en principio siempre que no exija compromiso ni tiempo. En relación a las cuestiones de epistemología, a la que todos los textos dedican un capítulo, los resultados fueron lamentables en ambos grupos. No hay ni siquiera ideas previas al respecto luego ha habido escasa docencia previa de las mismas. Ello nos descubre una vieja realidad: una cosa es lo que prescriben los programas, y otra lo que será materia de examen, que siempre se trata con más superficialidad, y aquí la responsabilidad no es de los alumnos sino nuestra.

Naturaleza e interacción de la luz con la materia: colores, reflexión, difusión y refracción

He seleccionado este grupo de preguntas debido a la importancia que le dan los autores antiguos como Aristóteles y Ptolomeo y el supuesto paralelismo entre los errores históricos y la evolución de las ideas previas de los alumnos. Los errores acerca de la claridad ambiente o del color de los cuerpos están sustentados por los preconceptos que el falso sentido común ha ido forjando en los alumnos. Son sumamente persistentes al cambio incluso en edades adultas. El ítem pretendía medir el grado de conocimiento de la composición de la luz blanca, su comportamiento en un medio dispersivo, y explorar las diferencias entre los colores reales y virtuales de los antiguos. Para ello utilicé preguntas que tenían ejemplos con prismas, arco-iris, difusión en nubes, óptica atmosférica y colores primarios.

Al contrario que en los ítems anteriores, sí existe una literatura abundante sobre las ideas previas en éstos. Son fenómenos familiares y complejos en los que sí se observa el paralelismo con las concepciones históricas.

NATURALEZA E INTERACCIONES DE LA LUZ (I)

14.- ¿Cuándo abres los ojos en una habitación a oscuras, no detectas los objetos pero si enciendes una luz lo haces sin dificultad. ¿Ves alguna relación entre ambos fenómenos? (elige sólo una respuesta).

- Porque el aire se vuelve luminoso y podemos ver los colores de los objetos ☐
- Porque los cuerpos radian sus propios colores ☐
- Porque la luz choca con los objetos y éstos reemiten luz ☐.

INDICE GCON = 90 ;INDICE GEXP = 92. PESO RELATIVO =1

15.- En un día nublado ¿tenemos sombra? ¿cómo lo explicas?

INDICE GCON = 60 ;INDICE GEXP =92 PESO RELATIVO = 1

16.-Si observamos una hoja de papel blanco y un espejo sobre el suelo de una habitación oscura ¿qué objeto destaca más?¿Por qué?

INDICE GCON = 60 ;INDICE GEXP = 85. PESO RELATIVO =1

17.- El gato Garfield y su dueño Findus se encuentran en una habitación totalmente a oscuras con unas jarras de café. Elige las respuestas correctas: Garfield,



- a) no verá las jarras en absoluto ☐
 b) las verá con dificultad. ☐
 c) las verá sin ningún problema. ☐

Findus

- a) no verá las jarras en absoluto ☐ b) las verá con dificultad. ☐
 c) las verá sin ningún problema. ☐

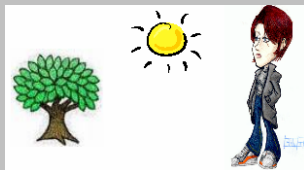
INDICE GCON = 25 ;INDICE GEXP =38. PESO RELATIVO = 1.

18.- Carolina mira un pequeño árbol en el jardín . Es mediodía. El sol brilla y es fácil ver el árbol. Carolina piensa:

...De noche es imposible ver el árbol. Durante el día es fácil verlo. Está claro que depende de si el sol está o no. Son embargo hay una distancia entre el árbol y yo, y ambos estamos muy lejos del sol ¿ Cómo me ayuda en realidad el sol a ver el árbol?

¿Cómo contestarías las dudas de Carolina? Ayúdate de algún dibujo para completar tu respuesta.

INDICE GCON = 55 ;INDICE GEXP = 69; PESO RELATIVO =1



19.- Si se apunta un puntero de laser verde sobre un cielo estrellado, se ve un haz que parece llegar a las estrellas, pero si se sustituye por un haz rojo no se observa la trayectoria ¿cómo lo puedes explicar?

INDICE GCON = 0 ;INDICE GEXP = 10 ; PESO RELATIVO = 0,5.

NATURALEZA E INTERACCIONES DE LA LUZ (II)

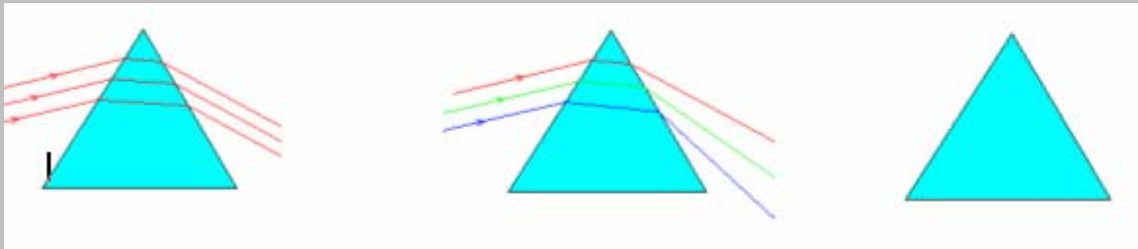
20.- El cuello de las palomas a veces se ve de color verde y a veces morado ¿de qué color es en realidad? INDICE GCON = 0 ;INDICE GEXP = 8 ; PESO RELATIVO = 0 PTOS.

21.- Los puntos de la pantalla de TV tienen los tres colores, rojo, verde y azul (RGB), ¿sabes por qué?
INDICE GCON = 70 ;INDICE GEXP = 92 ; PESO RELATIVO = 0,5 PTOS.

22.- La luz del sol ¿cuántos colores tiene? ¿cuáles?
INDICE GCON = 30 ;INDICE GEXP = 100 ; PESO RELATIVO = 0,5 PTOS

23.- En las fotos de la superficie lunar, el cielo se ve negro ¿cómo lo explicas?
INDICE GCON = 70 ; INDICE GEXP = 54 ; PESO RELATIVO = 1.

24.-Tres rayos de luz roja incidentes sobre un prisma se desvían según el dibujo adjunto. Tres rayos rojo, verde y amarillo como se indica también ¿Cómo lo haría un único rayo de luz blanca?
INDICE GCON = 15 ;INDICE GEXP = 38 ; PESO RELATIVO = 1.



25.- En algunas ocasiones se pueden ver en el cielo trozos de arcoiris incompleto. ¿Puedes suponer alguna razón que lo explique?
INDICE GCON = 60 ; INDICE GEXP = 64 ; PESO RELATIVO = 1.

RESPUESTAS COMPARADAS

14.- Sorprendentemente para mí, cuando esperaba comprobar la persistencia de la teoría aristotélica que responsabiliza a la transparencia del medio en presencia de luz de la posibilidad de identificar los objetos, un 90% del GCON achaca correctamente el color de los cuerpos a la reemisión de algunas radiaciones por éstos cuando reciben una luz blanca, y sólo un 5 % a la teoría aristotélica, mientras que un 92 % del GEXP lo atribuye a la causa correcta. Esto choca con el testimonio de otros investigadores, por lo que debo buscar la diferencia en el hecho de haber expresado la pregunta en un cuestionario de opciones cerradas. Quizás de expresar la pregunta de modo abierto, la mayor espontaneidad de las respuestas hubiera cambiado los resultados. Es tema pendiente para investigaciones ulteriores.

15.- Tanto esta cuestión como las tres que le siguen, son recogidas por su interés de textos americanos y europeos que destacan que una de las ideas claves es la reflexión difusa asociada a la difusión de la luz. La misma es responsable del desconocimiento en la construcción de sombras e imágenes. Un 60 % del GCON y un 92% del GEXP aciertan que no hay sombra en los días nublados, lo que parece un éxito aceptable, pero los preconceptos que en muchos casos se acercan a lo correcto, nublan la pretendida claridad de juicio. Casi todos se perciben de que las nubes hacen de filtro de los rayos que llegan, pero muy pocos atribuyen a la difusión luminosa multidireccional la causa de la claridad y la carencia de sombras de los objetos. Las respuestas fueron de índole diversa:

- Hay respuestas que achacan al sol la no formación de las sombras: *Las nubes filtran y se ve poca sombra. Los rayos de luz atraviesan las nubes pero pierden intensidad. No, porque no hay luz solar. No hay suficiente luz para crear la sombra. No, no hay ninguna luz que proyecte, No, la luz del sol no llega totalmente. No la luz del sol se refleja y viene por distintos sentidos*
- Los hay que sí piensan (no lo han observado) que hay sombra: *Sí porque algo de luz llega a nosotros (si no, sería de noche). Sí, parte de los rayos atraviesan las nubes. Sí, las nubes tapan el sol. Sí, porque no se tapa de todo el sol. Sí, hay luz pero menos. Las nubes filtran y se ve poca sombra. Los rayos de luz atraviesan las nubes pero pierden intensidad. No, la luz no rebota en los objetos y éstos no pueden emitir sus colores.*
- También hay respuestas acertadas: *No habría un único foco sino que estaríamos rodeados por la misma intensidad de luz. Las nubes dispersan la luz. La luz difunde, por ello no hay sombra. Las nubes refractan la luz*

16.- Un 60 % del GCON y un 85 % del GEXP responden acertadamente que es el papel el que destacará más que el espejo, pero son también muy contadas las explicaciones correctas como nos indica la muestra.

El preconcepto de que el color blanco del papel es una propiedad inherente del mismo aún en ausencia de luz, está presente en varias respuestas: *La luz la hace reflejar más (la hoja). El folio contrasta más. Los blancos se ven en la oscuridad, el espejo no tiene color. El papel blanco reemite casi toda la luminosidad que recibe .El papel emite luz propia. El papel refleja la luz. El papel, porque el espejo simplemente refleja todo lo de la habitación. El papel al ser blanco destaca en la oscuridad. El papel retiene el color que absorbió cuando había luz. El color blanco es fácilmente captable por el ojo humano. El papel porque es más claro (antes ha dicho que el color se debe a el cuerpo reemite sólo algo de luz).*

Al contrario que al papel, al espejo se le sabe carente de color y que sólo puede reflejar la luz (o la “oscuridad”) como se expresa repetidamente: *El espejo refleja la oscuridad .La función del espejo es reflejar, luego si no hay nada que reflejar, no se verá. Lo mismo para el papel; sin luz no puede radiar su color. El papel porque el espejo refleja lo mismo que hay en la habitación, es decir, oscuridad. El espejo si no hay luz, no la refleja.. La hoja de papel puede emitir color en ausencia de luz pero el espejo no.El espejo sólo refleja objetos.El espejo refleja la oscuridad. El papel sí emitirá pero el espejo no tiene luz que reflejar. El papel absorbe la poca luz que pueda haber, pero el espejo necesita más luz para destacar.*

Pocas preguntas apuestan por el espejo: *El espejo, porque refleja cualquier mínima luminosidad. El color blanco no se ve porque no hay diferenciación de colores aunque no haya luz. Ninguno de los dos se vería.*

Varios alumnos dicen que *el espejo refleja la oscuridad* la entienden como un ente, y no como la ausencia de luz. Otros piensan tácitamente que el color blanco es una propiedad interna del papel. La cantidad de errores registrados muestra que ninguno entendía correctamente la reflexión difusa en el papel.

17.- La vieja cuestión de la visión de los gatos en la oscuridad total sigue teniendo una gran fuerza: Sólo el 25 % del GCON y el 38% del GEXP la han desterrado, lo que evidencia la concepción extromisiva de estos alumnos que sintoniza con la presunción del “ mal de ojo” aún existente en la España rural. Es por tanto un preconcepto a desterrar.

18.-El 55% del GCON y el 69 % del GEXP respondieron correctamente que la luz ambiente incide en los objetos y reemiten (o reflejan) los colores que les son característicos, pero algunas explicaciones heredan implícitamente la citada concepción aristotélica del medio que se torna transparente: *El sol ayuda a Carolina mediante los rayos que emite durante el día. El sol da luz y el pino es oscuro, por lo que destaca. Los rayos de sol llegan hasta Carolina, el árbol y el espacio intermedio. Porque el cono de iluminación del sol es muy grande.*

19.-La pregunta, se responde desde los conceptos de difusión de la luz (*scattering*) en un medio (dependiente de la longitud de onda) y la mayor sensibilidad del ojo para la luz verde, aunque yo sólo pretendía que lo relacionasen con la interacción luz-materia y sacar a luz preconceptos nuevos. Sólo un 10% del GEXP se acerca a una relación correcta. Frente a una situación novedosa, y faltos de un bagaje científico mínimo, se disparan las explicaciones: *El verde ilumina las partículas de polvo y el rojo no. El laser verde es más potente y por ello se ven más los choques con el aire (interpretaciones corpusculares de la luz). El rojo es un color más oscuro y el verde llega más lejos. Los rayos de luz verde son más largos. (se inventa una nueva cualidad de los rayos, su longitud). El verde se propaga manchando el medio pero el rojo no (aquí subyace un concepto material de la luz como un fluido continuo y deformable .) El aire refleja el verde pero absorbe el rojo (concepción del aire a modo de esponja de luz) . El puntero verde se refleja en la luz que emiten las estrellas mientras que el rojo no (a esta explicación no le veo ningún sentido). El verde tiene mayor longitud de onda. Las ondas verdes son más intensas. El haz de luz verde se ve mejor (aunque simplista, se acerca bastante a la respuesta correcta de que la Evolución nos ha hecho más perceptivos al color verde) .*

20.-Una pregunta difícil sobre un fenómeno ni siquiera conocido por algunos compañeros y que fue tema de interés de los alumnos durante varios días, suscitó varias respuestas y ninguna correcta. A pesar de este fracaso sirvió para centrar el futuro interés de los alumnos en los aspectos ondulatorios de la luz. El color del cuello de las palomas pasaba por ser: *iridiscente, morado y verde, dependiente del ángulo, de los dos colores pues depende de la luz que les dé, verde, gris, morado, negro, blanco, depende del color que se refleje en cada momento. Su cuerpo refleja todos los colores excepto esos dos.* Decidí no puntuarla por su dificultad.

21.-El 70% y el 92% de ambos grupos respondía correctamente que la combinación RGB (Red, Green, Blue) reproduce el blanco pues es algo que ven en sus televisores a diario. Ninguna respuesta asomaba los conceptos de mezclas sustractivas que los departamentos de dibujo imparten repetidamente donde son los pigmentos de colores complementarios de estos colores los que consiguen el color blanco. De nuevo alguna respuesta fue sorprendente. *El color blanco no es nada, el negro se hace con todos.*

22.-Un 30% y otro 92 % acertaban con los siete colores de la luz solar. Las demás respuestas oscilaban desde que, al igual que afirmaba Descartes los colores se producen en el prisma, hasta las que hablan de tres colores, de un color variable según la hora del día.

23.-El 70% y 54% de respuestas respectivas relacionaban con la ausencia de atmósfera el color negro del cielo lunar, lo que parece un buen resultado pero, de nuevo, la explicitación de los preconceptos descubría que una respuesta correcta no siempre indica una comprensión suficiente, y que al haber tan pocas variables implicadas, se acierta a menudo en su elección sin entender los mecanismos. Algunas opiniones decían:

- El color negro como cualidad del espacio: *El espacio exterior es negro* (también lo es en la Tierra pero no cae en ello). *El Universo es negro, no hay luz. Porque no tiene luz. El espacio es oscuro.*
- Hay preguntas que relacionan con la atmósfera, a veces de modo incorrecto: *Los rayos del sol no influyen en esa parte del cielo y al no haber atmósfera vemos al cielo como realmente es. Como no hay atmósfera, sólo se aprecia la nada del espacio. No hay una atmósfera que “retenga” la luz* (este alumno evidencia su concepción estática de la luz) . *No hay atmósfera, no se dispersa la luz. Porque no hay medio donde pueda rebotar. No existen partículas que atraigan la luz. Porque no hay cielo y lo que se ve es el espacio. Negro, por la interrelación luz-atmósfera.*
- Otro necesita de un medio para transportar la luz : *Porque el cielo es infinito y no hay aire para llevar la luz.*
- Algunos buscan relación entre el color del cielo como reflejo de la superficie del mar. *No porque el cielo que se ve en la Tierra es el reflejo del mar. Porque no hay mar que es el que el color azul al cielo .El color azul del cielo es reflejo.*
- Hay también respuestas difícilmente clasificables, poco pensadas y centradas en del la lectura del problema: *Porque ponen algo en la cámara, Porque siempre será de noche... La luna absorbe toda la luz. El vacío no refleja luz, sólo la absorbe hasta que ésta choca con un cuerpo que la refleje en un espacio tan grande. Debido a que la superficie lunar devuelve gran parte de la luz que recibe, en un efecto parecido a la contaminación lumínica terrestre. No, porque no se refleja el solPorque no hay*

*luz que lo ilumine .Porque no se refleja el sol. Nada detrás que refleje la luz solar.
Porque no inciden los rayos de sol en la superficie*

24.-Sólo el 15% y el 38% respectivamente acertaron a esta cuestión, a pesar de que se responde en los libros de 2º y 4º ESO. El registro de opiniones distintas de cómo salía el rayo blanco, fue alarmante:

- la luz blanca no se descompone tras atravesar el prisma,
- salen siete colores en abanico desde un punto de la segunda superficie,
- salen tres colores en trayectoria correcta,
- salen tres colores que emergen en ángulo en un punto de la segunda superficie,
- salen tres colores que emergen curvados,
- sale el rayo blanco sin desviarse y,
- finalmente, los que optaban por el rayo blanco que sale desviado.

Es en este ítem donde percibí la mayor alarma: muy pocos estudiantes son capaces de aplicar correctamente la ley de Snell en clara coincidencia con los estudios de Amarjit (1990), luego es una cuestión merecedora de atención básica en el desarrollo de su enseñanza.

25.- El 60 y 64 % achacaban correctamente a la presencia de gotas de agua en la atmósfera el color del arcoiris (continuo o no, dependiendo de la ubicación de las gotas de agua) aunque ninguno proponía una solución exhaustiva:

El arco iris se produce cuando llueve y para de hacerlo. El rayo no atraviesa completamente. Algún elemento obstaculiza la refracción de ese arcoiris. El sol no sale del todo. Porque hay algo, que al refractarse, refleja los colores en el cielo. Las nubes lo tapan .Porque la luz cae sobre agua sucia. Que está lloviendo en otro sitio del planeta y desde allí se puede ver.

CONCLUSIONES

Existen confusiones muy tenaces con las que convive el alumno, no siempre imputables a su inmadurez. Muchos saben desde pequeños lo de los siete colores pero también saben por el departamento de Dibujo de sus centros, que tres pigmentos consiguen el negro y que tres luces el blanco. Prácticamente nadie les aclara que la explicación es sencilla si se admiten los tres pigmentos cromáticos en las células del ojo propuestos por Young y, como consecuencia, el alumno llega a adulto sabiendo cómo pero no por qué funciona esta dualidad. Una mayor comunicación entre los departamentos implicados sería muy deseable.

Otro tema preocupante fue la dispersión en prismas: fue inesperado el número de disparates a la hora de dibujar la tanto la refracción de los rayos monocromáticos como la dispersión de la luz blanca.

Mientras que los conceptos de oscuridad y color de los cuerpos se entiende bien por los alumnos, la difusión de la luz y la reflexión especular ya no tanto. Siguen persistiendo de modo más o menos encubierto los viejos tópicos de la visión nocturna de algunos animales como los gatos (probablemente asociado al brillo de sus ojos en la noche) y la cualidad del medio que se hace transparente al llegar la luz y ello le permite ver los objetos.

Ondas de luz y materia

El ítem siguiente pretendía el conocimiento de sus interpretaciones de las relaciones entre algunos fenómenos ondulatorios (mecánicos y luminosos) y los principios que los rigen. La literatura relacionada con los aspectos ondulatorios de las ondas de luz las EEMM es realmente escasa.

Previo al desarrollo de estos temas, quería conocer si en la experiencia inmediata del alumno, había ya (o no) un espacio para la interpretación de estos fenómenos. Mi opinión inicial era que no siempre lo hay y que el sujeto aprende a convivir con su ignorancia tanto en temas científicos como en otros, asumiendo su pereza o incapacidad para abordarlos.

26.- Si se extrae todo aire de una campana no se oye el sonido de un despertador ¿se vería la luz de una pequeña linterna encendida en su interior?

SI ☐ NO ☐

¿Por qué?

INDICE GCON = 81 ;INDICE GEXP = 95 ; PESO RELATIVO : 1PTO.

27.-De los siguientes fenómenos, algunos tienen comportamiento de onda y otros no. Destaca con una cruz los que lo sean y justifícalo brevemente en cada caso.

Tsunami ☐

Sonido ☐

Piedra que cae ☐

Luz ☐

INDICE GCON = 45 ;INDICE GEXP = 38 ; PESO RELATIVO : 1PTO.

28.-Cuando un instrumento emite una nota musical ¿llegan las partículas de aire inicialmente perturbado hasta nuestro oído?

SI ☐

NO ☐

NO SÉ ☐

INDICE GCON = 60 ; INDICE GEXP = 61 ; PESO RELATIVO : 1PTO.

29.-¿Cómo explicas que oigamos el sonido de un foco sonoro que está situado detrás de una tapia muy gruesa? relaciona con la tapia ☐ relaciona con la propagación por el aire ☐

INDICE GCON = 10 ;INDICE GEXP = 25 ; PESO RELATIVO = 1 PTO.

30. Cuando miras de noche a un foco lejano, al cerrar levemente los ojos se observa que aparecen rayas largas luminosas ¿Cómo lo explicas?

INDICE GCON = 5 ;INDICE GEXP = 0 ; PESO RELATIVO = 1 PTO.

31. Si miras al sol de frente con los ojos entreabiertos, se ven destellos de varios colores.¿De dónde proceden?

INDICE GCON = 0 ;INDICE GEXP = 38 ; PESO RELATIVO = 1 PTO.

32. ¿Te parecería una broma si alguien te dijera que luz más luz puede dar oscuridad?

INDICE GCON = 0 ;INDICE GEXP = 31; PESO RELATIVO = 1 PTO.

INDICES GLOBALES: GCON = 29 ; GEXP = 41

RESPUESTAS COMPARADAS

26. Esta cuestión pretende sintonizar con la categoría de los “Experimentos Imaginados”, irrealizables de hecho en un laboratorio escolar (es imposible conseguir un vacío por debajo de la presión de vapor del aceite con las bombas más sensibles) , pero de gran riqueza intelectual. Del GCON, 17 de 20 alumnos (81%) responden correctamente y 12 de 13 del GEXP (95%) también. Las respuestas, correctas o no, se soportan en una falsa evidencia o erróneas extrapolaciones. El aire es para unos el transmisor (argumento mucho más plausible) y para otros un estorbo. Aunque la respuesta correcta se podía encontrar en la observación de que vemos los astros lejanos cuya luz viaja por el vacío, su justificación es difícil.

Algunos creen en un medio que transmite la perturbación:

No, porque la luz se propaga por el aire y al crear un vacío no habría un medio para propagar. El fuego necesita aire. La luz no puede viajar en el vacío No, porque al no haber aire no viaja la luz. La luz no se propagaría. Si no hay aire no hay partículas para chocar No pasa por no haber oxígeno .Como el despertador no se oye, tampoco la luz se ve. No, porque la luz no podría reflejarse en nada.

Otras opiniones son encontradas con las anteriores:

No lo necesitan: El aire estorba la luz, no tiene nada que ver con el aire. La luz no necesita un medio para propagarse. La luz viaja en el vacío.. No es necesario que haya aire, las ondas electromagnéticas viajan en el vacío. La luz no es una onda mecánica. El universo no tiene aire y sí lo atraviesa la luz,. Sí porque se propagan las ondas. La luz es una onda, se propaga en línea recta.... Sí porque emite luz y no sonido. Sin aire no hay sonido, pero sí luz... Lo mismo que una bombilla tiene el vacío, y al no haber oxígeno, le permite alumbrar.

27. Aquí se evidencian las contradicciones tácitas aunque las respuestas hayan sido correctas. Sólo me interesaba la pregunta sobre la luz, que iba acompañada de tres distractores. En el GCON los que achacaban un comportamiento ondulatorio conseguían un índice de acierto del $n = 45\%$ mientras que en el GEXP era $n = 38\%$. Destacando que a estas edades ningún alumno sabe aún de la dualidad onda-corpúsculo, no tiene mucha coherencia que en la cuestión anterior sea mayoritaria la respuesta que opina que en el vacío se propaga sin problemas, mientras que a continuación, estos índices indican que muchos piensan en una naturaleza ondulatoria sin medio soporte.
28. Un 50 % del GCON ve la necesidad de un medio que soporte el sonido sin viajar con él, mientras que otro 50% del mismo grupo, que antes había asignado una naturaleza de onda al sonido, cree que las moléculas de aire viajan con él. Un 61% del GEXP apoyan también

la primera opción, un 16% la segunda y el resto no opina. Sólo aparece expresada una idea explicativa: *No, las partículas se transmiten las ondas unas a otras.*

29. La pregunta debió exponerse insistiendo en la insonorización total de la tapia, a fin de dejar la difracción en el aire como única opción. Una mayoría de respuestas pensaba que las vibraciones o la porosidad de la tapia podrían explicarlo. Sólo un 10 % del GCON y un 46 % del GEXP enunciaban la posibilidad de fuera el resultado de su trayectoria por aire (*difracción*, aunque no conozcan aún el término).

30. Una respuesta recurrente sugiere que la luz se almacena en el ojo y por ello vemos estos rayos. Aquí entiendo que subyace la concepción de las *eidola* griegas :*La imagen queda en el cerebro. La imagen del foco queda grabada unos instantes en el cerebro. Las ondas de luz quedan impregnadas en el ojo. Te queda el recuerdo en el ojo. Porque tus ojos guardan la luz. Se ha quedado grabado en el ojo. La imagen se queda al cerrar los ojos..*

Otras respuestas buscan también una permanencia en motivos fisiológicos: *Se ha quedado la luz en la retina. Porque en las células de la retina queda reflejada la luz y éstas quedan estimuladas. Se te queman algunas células la memoria guarda la imagen un rato y la refleja. Esos rayos rebotan en la retina. Se concentra la luz en la retina. Es el reflejo que queda en mi mente. Se nos queda reflejado en el ojo. La retina queda impregnada temporalmente por la luz (postimágenes). La humedad que se crea en el ojo distorsiona la luz. Como hay contraste grande de la oscuridad con el foco, el ojo necesita tiempo para desprenderse de ese contraste Te deslumbra y queda momentáneamente en el ojo. Al cerrar los ojos se estiran los rayos.*

Sigue apareciendo la dimensión energético- corpuscular de la luz como algo que provoca impactos. No sé si ello se deriva del hecho de que en un golpe veamos luces, o que al cerrar los ojos, tras fijarnos en un foco, aparezcan las conocidas post-imágenes: *Las produce el impacto de la luz en el ojo... La intensidad del foco penetra la vista en pocos segundos. Vemos el rebote de la luz con las partículas de polvo.*

Una respuesta tiene un carácter *extromisivo* : *Salen de nuestras pupilas intentando captar la imagen.*

Aparecen de nuevo las respuestas poco clasificables: *Al abrir los ojos han de estar aptos, para ello reflejan el objeto fijado. El foco sobre fondo negro, destaca más, es más fácil centrarse y se retiene más los rayos.*

31. Las respuestas son de nuevo muy dispersas. Algunas tienen interpretaciones fisiológicas: *El ojo tiene una capa mojada que actúa como espejo. La lágrima, a modo de arco iris, descompone la luz blanca en colores. Al cerrar los ojos, los rayos se polarizan y los vemos en colores. El ojo separa los colores porque el contacto es malo al cerrar el ojo.* Otras acuden a la naturaleza de la luz: *Los colores ya estaban en el rayo, Proceden de la capa de ozono*

32. Un 35 % del GCON y un 33 % del GEXP aceptan esta posibilidad sin más explicaciones. Las explicaciones a un fenómeno que no conocen y sin embargo creen fiable por venir del profesor son variopintas: *Cuando hay mucha luz, tus pupilas se ponen muy pequeñas y entonces no puedes ver bien. Es posible que unos colores absorban a otros. La ciencia explica las cosas más abstrusas. No, porque la mezcla de los tres colores da el negro*

CONCLUSIONES:

Las preguntas eran difíciles y las respuestas que dieron los alumnos no estaban en su bagaje previo, sino que las construyeron al respecto. Esta improvisación me ayudaba a estimar la capacidad de improvisación de los chicos. Aquí no se buscaban respuestas correctas y sí analizar la coherencia de su razonamiento. Yo destacaría como algo negativo, que las respuestas son demasiado espontáneas: en muchas ocasiones no hay preconceptos sino que, a partir de supuestos gratuitos, los alumnos derivan conclusiones sin ningún apoyo racional. Si como docentes conocemos estos mecanismos podremos corregirlos mejor.

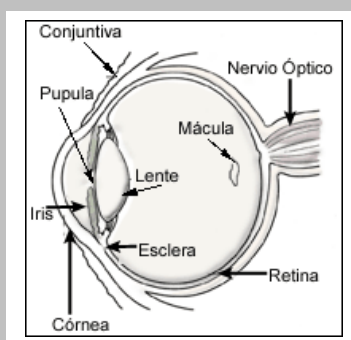
Aunque las muestras de población sean tan pequeñas, las respuestas a ítems de naturaleza fenomenológica, comienzan a ser homogéneas, lo que nos permite concluir que aunque las cuestiones de naturaleza cultural tienen respuestas diversas, sí hay mayores concordancias cuando se interpretan, aunque no sea de modo correcto, fenómenos naturales. De otro lado, el análisis en detalle de respuestas a distintos aspectos de un mismo fenómeno, demuestra que en la mente del alumno coexisten a menudo explicaciones contradictorias e incoherentes.

FUNDAMENTOS DE LA VISIÓN

El estudio del globo ocular y su anatomía, es un contenido de los cursos iniciales de Ciencias de la Naturaleza de la ESO, aunque su interpretación como instrumento óptico se descuide. Pretendía saber si los fenómenos más cotidianos de la visión habían sido merecedores de su atención.

34.- Cuando inicias la observación de un objeto pequeño situado en el suelo, debes fijarte en él un rato hasta que lo percibes con nitidez. ¿Puedes explicar por qué? (puedes ayudar de un esquema ocular)

INDICE GCON = 5 ;INDICE GEXP = 15 ;



35.-¿Qué influencia tiene el cristalino (o lente) en la observación de un objeto? ¿y la retina?

INDICE GCON = 10 ;INDICE GEXP = 46 ;

36.-¿Por qué razón las personas de edad madura adultas estiran el brazo para leer?

INDICE GCON = 10 ;INDICE GEXP = 15 ;

34. Es otro de los ítems en los que no hay ideas previas generalizadas. El 5 % de los chicos del GCON (su mayoría) achacan a la dilatación de la pupila la demora en el enfoque mientras que el 15 % del GEXP relacionan correctamente esta demora con la acomodación del cristalino. El resto de respuestas la atribuyen: *al tamaño del objeto, a que nuestra visión no es como la de otros animales, a que la pupila se hace más grande o pequeña y con ella el tamaño del objeto*. Otra explicación relaciona el tiempo de acomodación con el tamaño del objeto: *si el objeto es pequeño, la imagen tarda más en llegar al nervio óptico*.

35. El 10% del GCON y el 46% del GEXP responden correctamente que su función es el enfoque de las imágenes. Para otros, las razones son distintas: *regular la luz, percepción de los colores del objeto, permite que pase la luz al ojo*.

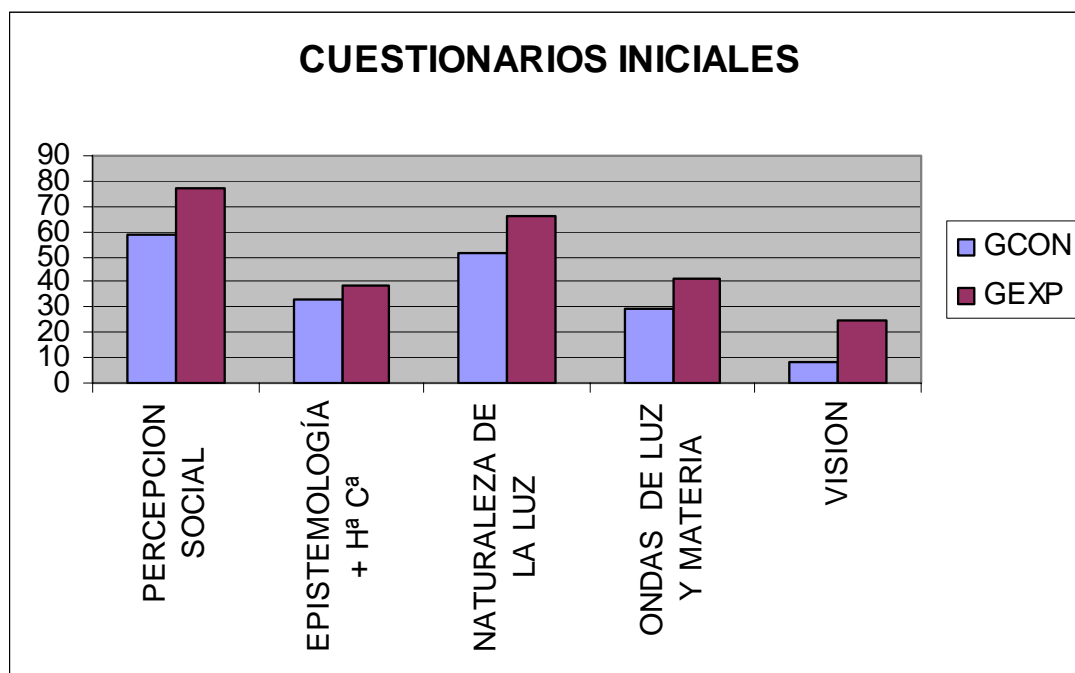
36. El 40 % del GCON y el 70 % del GEXP respondían con la trivialidad de que esto se debe a que el ojo pierde su capacidad de ver de cerca con la edad. Sólo un 10 % y un 15% se acercan a una respuesta aproximada que achaca la acción a lo defectuoso de los músculos del cristalino (y no a la pérdida de elasticidad del mismo).

Conclusiones:

Resultó ser otro tema en el que la ignorancia es abrumadora. La ausencia de respuestas comunes me reafirma a que en este tema los preconceptos son escasos y de nuevo el sujeto convive con situaciones a las que no tiene respuesta. Dada la importancia de la salud ocular y lo importante de proveer unos conocimientos reducidos, debería dedicarse un tiempo breve, pero intenso y funcional a la enseñanza de estos temas.

Conclusiones finales sobre los conceptos previos

Refundiendo los ítems parciales en un diagrama de barras, se obtiene una panorámica amplia de las dos poblaciones. Para el propósito de la investigación hubiera sido muy deseable partir de muestras de población muy similares en número (a ser posible elevado) y en cualificación, pero la servidumbre del terreno nos presentó dos grupos de diferencias sensibles en la mayoría de los tópicos.



En ambos grupos los ítems de epistemología, visión y naturaleza ondulatoria de la luz, tuvieron resultados muy negativos. Aunque mi experiencia del GEXP no era muy triunfalista en lo que

respecta a resultados académicos (sólo había tres alumnos de nivel notable-sobresaliente) resultaron ser poseedores de más cultura y mayores recursos para explicar fenómenos nuevos. Las acciones futuras con ellos irían encaminadas a subsanar las graves lagunas de conocimiento y los errores conceptuales detectados, así como a construir en sus mentes esquemas conceptuales provistos de información y recursos para el análisis de situaciones nuevas.

3.5 Investigaciones complementarias sobre preconceptos ópticos

Extrañado con algunas respuestas del formulario anterior relativas a la reflexión difusa, concluí que la expresión de la pregunta y las condiciones de realización son decisivas para optimizar los matices de los preconceptos del alumno, que al no tenerlos explicitados provocan que las respuestas sean a menudo contradictorias.

Durante el mismo curso recabé nueva información en otro centro de la capital, el IES San Juan Bautista integrado por alumnos de un estatus medio-alto, con algunas cuestiones mejor expresadas y completadas con gráficos de ayuda, que solapaban tanto con el cuestionario inicial como con las investigaciones extranjeras mencionadas en otro apartado de este trabajo.

Aunque el cuestionario es tan amplio como el que sirve de inicio para este trabajo (ver anexo I), destaco sólo las cuestiones que me han aportado una información complementaria:

- Se repite el desconocimiento casi general de los cauces actuales de la investigación, del lenguaje científico básico, de cómo se publican las investigaciones y de la importancia de los trabajos en equipo en la ciencia.
- A pesar de la frecuente indolencia frente al estudio, se da una unánime valoración positiva al trabajo de los científicos y al interés por conocer la historia de los científicos
- Los deficientes conocimientos de los aspectos culturales y epistemológicos de la ciencia, peores que en los grupos iniciales, fueron insólitos para mí en hijos de padres de profesiones liberales, con las honrosas excepciones de los hijos de algún investigador o profesor.
- El absoluto desconocimiento en la formación de las imágenes por lentes en pantallas y su observación a ojo desnudo.
- En contra de los resultados de otras investigaciones, un porcentaje apreciable (45%) sí diferencia la luz de la fuente. La misma iba precedida de otra que preguntaba acerca de la extinción de la luz en la tierra tras una supuesta desaparición del sol.
- Sólo un 17% relacionan el mal de ojo con la supuesta mirada extromisiva de una *bruja* o *un tuerto* encontrados en el lenguaje coloquial que se traduce en mala suerte.

- Al reformular mejor la concepción aristotélica de la transparencia y opacidad del medio, encontré su persistencia en un 41 % de los encuestados.
- No observé ningún resto de la interpretación intromisiva de la visión de los “eidola” que daban los atomistas ante la cuestión de cómo caben imágenes de objetos como una montaña con un instrumento tan pequeño como el ojo. Las respuestas oscilaban desde el conocimiento de la función del cristalino como lente hasta la incoherencia de atribuir el fenómeno a la *visión periférica*.
- Es casi unánime atribuir a los gatos una visión nocturna aún en ausencia total de luz con justificaciones simplistas.
- Mientras que un 41 % interpretan correctamente la difracción del sonido tras una tapia con su comportamiento ondulatorio, son contadas las respuestas acertadas cuando se sustituye el foco sonoro por otro luminoso como el sol.

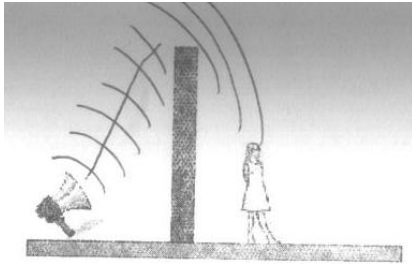


fig.1 Interpretación ondulatoria

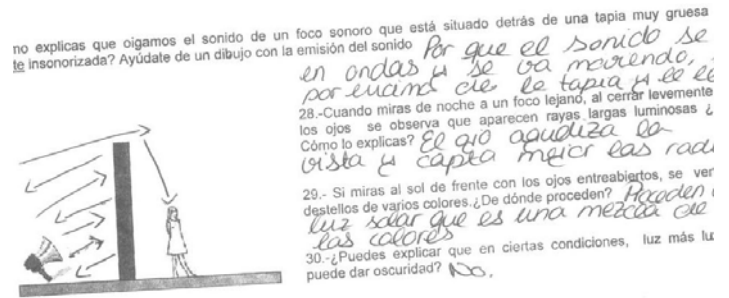


fig.2 El sonido "sube" por encima de la tapia

- Es prácticamente general el desconocimiento de la reflexión difusa en la interpretación de la luz reflejada por un papel blanco o un espejo, el color de la atmósfera, la claridad ambiente en días soleados o nublados.

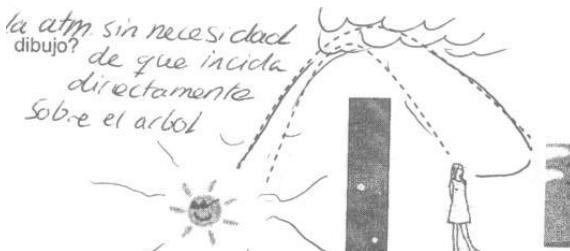


fig.3 interpretación correcta de la reflexión difusa

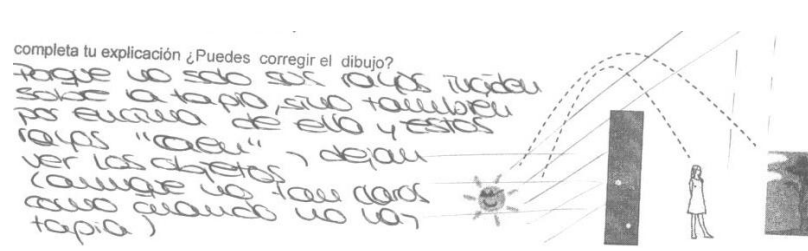


fig.1 Los rayos "caen" por encima de la tapia



fig.3 Es la "claridad" la que permite ver los objetos

- Una mayoría de alumnos (69%) no sabe relacionar la luz que incide sobre un objeto con su visión.

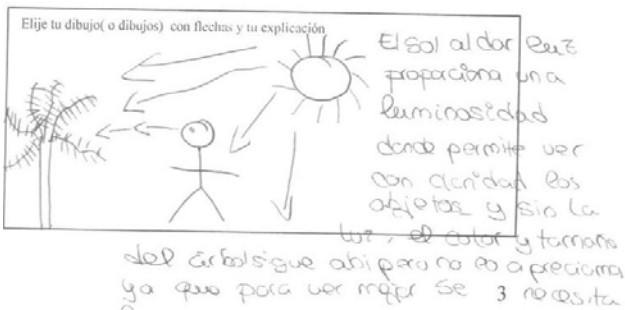


fig.4 la luminosidad "permite" ver

- Este desconocimiento se acentúa hasta el 90% para interpretarla en días nublados

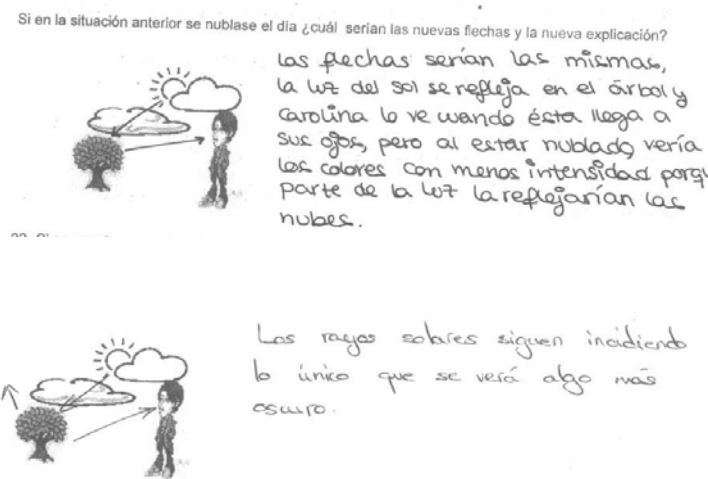


fig.5 los rayos "atraviesan" en línea recta las nubes aunque filtrados

- Sólo in 17% acierta en la predicción cualitativa de la dispersión de un rayo de luz blanca en un prisma.
- Es aceptable el conocimiento de los defectos oculares y de la función del cristalino y la retina en la visión.

Con la información de los dos cuestionarios, elaboré la Unidad Didáctica e inicié finalmente la correspondiente aplicación de todas las estrategias indicadas.

3.6 Los alumnos después del proceso

Para medir los resultados de la acción didáctica, decidí mantener la misma clasificación de ítems y, no interesando ya los preconceptos, seleccionarlos de modo que un alumno bueno del GEXP debería ser capaz de su correcta solución. Su redacción y temas los seleccioné con un lenguaje y temas próximos al alumno incluyendo pruebas de índole cualitativo puesto que daban la información que se escapa en las convencionales del tipo de Selectividad. Lo inédito de las preguntas para evitar que recordasen las respuestas iniciales, y ello suponía una dificultad en la consecución de una objetividad exhaustiva en el proceso de comparación y medida de progresos, pero su novedad permitía saber si los conceptos estaban lo suficientemente interiorizados como para explicar situaciones nuevas.

Los tres ítems iniciales versaban sobre los aspectos más generales de la Ciencia: Empatía del alumno con la Ciencia, Historia de la Ciencia., Percepción Social de la actividad científica y Epistemología. Los restantes se centraban en la interpretación de fenómenos ópticos muy similares a los de los cuestionarios iniciales: Naturaleza de la Luz y sus interacciones, Comportamientos Ondulatorios de la Luz, y Visión.

En cuanto a los resultados, era de esperar que los alumnos del GEXP deberían llevar ventaja en los temas de Epistemología e Historia de la Ciencia, puesto que solo ellos los tratarían con cierto detenimiento, pero ya no estaba tan claro que sucediera lo mismo en los temas más académicos: el hecho de mantener el mismo ritmo de trabajo incrementando los contenidos experimentales, históricos y epistemológicos, podría suponer una comprensión menor de mis alumnos, puesto que los alumnos del GCON los tratarían al menos con la misma intensidad, y en esto estaba el reto.

Al igual que en el cuestionario inicial, se asignaba un índice positivo porcentual a cada pregunta en relación a la puntuación óptima que yo mismo estimaba.

$$n = (n^{\circ} \text{ aciertos} / n^{\circ} \text{ aciertos óptimos}) \times 100$$

Si consideraba la pregunta de una relevancia especial en el ítem, le asignaba un peso relativo en el mismo hasta un factor máximo de tres. Del mismo modo, si la consideraba trivial, el factor corrector lo estimaba en 0,5. En los casos en que una respuesta óptima necesitaba de una aclaración además de la respuesta, penalizaba su no inclusión restando la cuarta parte de la puntuación obtenida. Veamos la descripción y resultados de cada ítem:

Empatía con la Ciencia

Aunque no figuraba en el cuestionario inicial, consideré ilustrativo incluir este ítem para tener una información más del perfil final de nuestros alumnos. Las preguntas intentaban estimar globalmente el grado de empatía, expresado en primera persona, sobre intereses, valoraciones o afectos personales (grado de aceptación, disfrute,...). A fin de no solapar este ítem con el siguiente (Percepción social de la Ciencia) incluí en él sólo las preguntas que implicaran actitudes personales y no un conocimiento objetivo.

1. De vivir en la edad media ¿qué temas te interesaría investigar? Idear aparatos para vivir mejor (nuevas telas, faroles de aceite más luminosos, etc), ☐ curar enfermedades ☐ construcciones y aparatos para defenderte de otras culturas (murallas, ballestas, pólvora,...) ☐ conocer los fenómenos naturales (arco-iris, por qué llueve, las estaciones, la astronomía,...) ☐ mejorar el diseño de barcos más rápidos para conseguir el protagonismo en el comercio de la seda ☐ construir nuevas armas para asegurar la primacía económica y política ☐
INDICE GCON = 49 ; INDICE GEXP = 54
2. Cuando comprendes un principio físico o resuelves un ejercicio difícil , ¿disfrutas intelectualmente o sólo sientes que has superado un obstáculo incómodo? disfruto ☐ me servirá para aprobar ☐ INDICE GCON =88; INDICE GEXP = 75
3. ¿Te detienes en las páginas científicas de la prensa como la página Aula o bien a observar los documentales de TVE2, Redes, Nacional Geographic, Discovery Channel,...? sí ☐ nunca ☐ INDICE GCON = 88; INDICE GEXP = 75
4. Científicos consagrados ganan bastante menos que otros profesionales menos cualificados, ¿te parece justo? sí ☐ no ☐ INDICE GCON =90; INDICE GEXP = 100

INDICE GLOBAL GCON = 76 ; INDICE GLOBAL GEXP = 76

LAS RESPUESTAS:

1.-De la primera pregunta, consideré que las respuestas más idóneas serían las que destacaban las afinidades de la Ciencia con las aplicaciones sanitarias (curar enfermedades) y la investigación no tecnológica (astronomía, etc), incluyendo las otras cuatro como meros distractores que no contabilicé. Los resultados globales, altos en ambos casos, fueron empatados entre ambos grupos y ello prueba que a estas edades, la Ciencia a estas edades aún una actividad que se respeta.

2.-Muchos docentes estimamos que, incluso en los buenos alumnos, va en grado creciente el desinterés hacia el conocimiento no funcional. El estímulo para el aprendizaje es fundamentalmente una buena calificación, y se estudia siempre que tenga utilidad para las PAU. Quería cuantificar esta impresión y los resultados fueron inesperados para bien.

3.-Los programas de divulgación científica con bastante sensacionalismo, aparecen cada vez con mayor frecuencia en las televisiones nacionales y extranjeras (*Redes, Discovery Channel,...*) y en los magazines (*Muy Interesante*, etc.). Aunque a veces la falseen, hacen una labor útil de motivación de la Ciencia y servían de un barómetro más para estimar la motivación de los alumnos. El sondeo mostró que suscitan un interés considerable.

4.- La remuneración de los investigadores, relacionada con la incidencia en la importancia que dan los gobiernos a la actividad científica y la repercusión en las vocaciones científicas, es un tema poco conocido en nuestro país. Fue unánime la opinión de la injusticia de la situación.

LAS CONCLUSIONES

Ambos grupos, con una buena puntuación, empataron en este aspecto. Los alumnos que han elegido la opción de Física, si descontamos los que llegan mal orientados, tienen una motivación apreciable por sus aspectos más cualitativos y lúdicos. Otra cosa es que ésta se mantenga cuando aparece la prueba del rigor matemático que algunos no soportan.

Percepción social de la Ciencia

Sabedor de la devaluada imagen de la Ciencia en nuestra sociedad, quería conocer la precisión de la información, imagen y valoración que los alumnos jóvenes tienen de ella y del científico

investigador al que subvencionan, de los lugares donde se gesta, y de los medios donde ésta se comunica y divulga.

5. Las cualidades de un buen investigador actual en genética, nanotecnología, etc...deberían ser (puntúa de 0 a 5): gran inteligencia y formación cultura científica cultura humanista creatividad saber trabajar en equipo un buen expediente académico humanidad una gran curiosidad ambición económica sociabilidad medios abundantes en su trabajo un entorno social inmediato que le refuerce moralmente devoción por el conocimiento disposición a comunicar sus avances a otros compañeros reconocimiento público de los avances de otros compañeros estabilidad laboral y familiar INDICE GCON =34; INDICE GEXP = 49
6. La creciente contaminación y cambio climático ¿son culpa de los científicos? sí ☐ no ☐ INDICE GCON =34; INDICE GEXP = 83
7. La actividad científica del organismo nacional CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas), financiado con dinero público ,¿tiene una función social o tecnológica inmediata o admite investigar cualquier tema (ciencia básica)? social ☐ básica ☐ INDICE GCON = 85;INDICE GEXP = 75
8. ¿Podría un científico publicar cualquier artículo en una revista especializada? sí ☐ no ☐ ¿por qué? INDICE GCON =50; INDICE GEXP = 65
9. ¿Puede un país moderno vivir sin investigación o le basta con adquirir patentes de países más desarrollados? Saldría perjudicado basta con comprar patentes ¿Por qué? INDICE GCON =50; INDICE GEXP = 52
10. ¿El científico/a de los países tercer mundistas, sin dinero ni equipos ,desarrolla menos trabajos que sus compañeros occidentales: porque le faltan medios económicos porque le falta equipo humano porque tiene menos información porque tiene menos estímulos otros (explícalo) INDICE GCON = 50; INDICE GEXP = 61

INDICE GLOBAL GCON = 45 ; INDICE GLOBAL GEXP = 64

LAS RESPUESTAS:

5.- Las respuestas a la primera preguntan indican un desconocimiento de algunos aspectos del perfil del científico actual: por ejemplo se les supone generosos en la comunicación de sus logros cuando la situación actual está bastante alejada de la imagen romántica: en cuanto que la consecución de proyectos y fondos pasa por publicaciones con cierto índice de impacto, aparecen las rivalidades entre equipos de líneas de trabajo similares. La comunicación a la comunidad científica, sólo sucede después de que el artículo haya sido publicado.

6.- Aquí no se culpa a la ciencia de su mal uso por los poderes que la gestionan desafortunadamente.

7.-En esta cuestión, detecté un desconocimiento de la existencia del organismo oficial. En el mejor de los casos, Las respuestas correctas sólo contestaban a cómo se suponía que debía ser su actividad.

8.- Muy pocos alumnos conocían la existencia y necesidad de árbitros (“*referees*”) antes de publicar cualquier artículo. A veces como sabemos, el árbitro no está a la altura de la nueva ciencia y retrasa el proceso.

9.-Argumentan frases triviales como *no deberían, etc* pero pocos son los que ven las ventajas objetivas de una autonomía política y económica.

10.- También hay bastante desconocimiento de los factores del retraso científico en estos países. Si nuestros alumnos y ciudadanos supieran que la universidades de USA estén plagadas de investigadores asiáticos y europeos, darían al dinero y los equipos estables la importancia que tienen.

CONCLUSIONES:

Los índices globales de ambos grupos no son muy altos. Ello pone en evidencia un hecho que se mantiene en el ciudadano medio: el investigador actual y su actividad están muy lejos de su vida diaria: no se conocen ni los tópicos que se investigan ni los organismo que los financian ni las vías de divulgación al resto de los científicos. Decidí para el próximo curso trabajar en más profundidad estos aspectos, en primer lugar en las clases, y en segundo, proponiendo la realización de un trabajo al respecto.

Epistemología e Historia de la Ciencia

Quise investigar si en tópicos a los que no referimos a diario como ley de Newton, modelo ondulatorio, teoría de la Gravitación Universal, se conocían mínimamente los términos ley física, teoría, modelo, etc. A continuación introduje un poco de Historia de los científicos y de sus teorías (que se supone se deberían impartir en cualquier temario) y de la evaluación de los límites del conocimiento. Debo comentar que a los alumnos del GEXP les encargué un trabajo escrito previo en el que entre en otras cosas, debían responder a preguntas muy similares a éstas lo que explica sus mejores resultados.

11. ¿Qué es una ley física? INDICE GCON = 0; INDICE GEXP = 52
12. ¿Y una teoría? INDICE GCON = 40; INDICE GEXP = 47 ¿Y un modelo? INDICE GCON = 0; INDICE GEXP = 34
13. La teoría de la gravitación de Newton servía para calcular órbitas de los cuerpos celestes ¿sigue siendo válida? ¿Se sigue utilizando? INDICE GCON = 60; INDICE GEXP = 31
14. La teoría corpuscular de la luz ¿ qué afirmaba? ¿de quién era? INDICE GCON = 80; INDICE GEXP = 75
15. ¿Y la ondulatoria de Huygens? INDICE GCON = 62; INDICE GEXP = 69
16. ¿Cuál era la más ajustada a la realidad en aquellos momentos? ¿por qué? INDICE GCON = 40; INDICE GEXP = 56
17. Las últimas teorías científicas ¿describen correctamente la realidad? INDICE GCON = 12 ; INDICE GEXP = 62

INDICE GLOBAL GCON = 37 ; INDICE GLOBAL GEXP = 53

LAS RESPUESTAS:

11.- Los resultados del GCON fueron muy deficientes y los del GEXP no tanto porque, como dije, jugaban con ventaja. Considero preocupante que un alumno bueno conozca bien el contenido de la Ley de Hooke por ejemplo, y no conozca el significado de la palabra *ley*.

12.- Aquí el desconocimiento del concepto *modelo* era igualmente preocupante. El concepto *teoría* era algo más conocido por la contextualización en ejemplos como la Teoría de Gravitación o Teoría Corpuscular. Bien es cierto que los mismos diccionarios traen a veces definiciones distintas de un mismo término, y distintas también de lo que el mismo científico consideraba.

13.- La idea de validez y los límites de cualquier teoría no está en casi ninguna respuesta, incluyendo el GEXP a pesar de que fue un tópico debatido en clase. Sabido es que una teoría es válida en cuanto que explica y predice fenómenos sin que ello signifique que se suscriba íntegramente. Creo que la causa estriba en que intuitivamente se buscan en la Ciencia verdades absolutas y por ello la provisionalidad es un matiz al que no se presta mucha atención. Saqué la conclusión de que debería haber insistido bastante más en esta cuestión.

14.- En las fechas del test, todos los alumnos ya habían estudiado en sus respectivas clases los tópicos de óptica y el Efecto Fotoeléctrico en donde se subrayan los aspectos corpusculares de la luz. Se suponía que tanto esta cuestión como la siguiente deberían ser respondidas sin problemas, pero aún así se observan dificultades.

16.-Sólo el prestigio de Newton bloqueó durante un siglo el avance de la óptica, y es así como lo expresé repetidamente a mis alumnos. Su teoría tenía que explicar la contradicción de cómo es que el sol aún continuaba enviando corpúsculos y cómo podría avanzar en ausencia de un medio. No obstante, aún mis alumnos obtuvieron respuestas muy deficientes.

17.- También con mi grupo insistí a lo largo de todo el curso en la provisionalidad de las teorías y de que sólo son válidas para explicar fenómenos, hasta que una nueva teoría explica los anteriores y otros nuevos. A pesar de ello, muchos chicos de ambos grupos, seguían pensando que hay teorías absolutas.

CONCLUSIONES:

Siendo aquí los resultados realmente deficientes para todos los alumnos, considero que también hay que proponer medidas para su mejora en el próximo curso. Durante la experiencia incluí la elaboración de un trabajo de forma voluntaria de modo que su calificación posterior se sumara a la nota convencional, pero a pesar de ello, constaté que muy poco de lo trabajado había quedado en sus memorias. La solución a ensayar, además de las acciones magistrales, las actividades cruciales y las discusiones, será elaborar unos pequeños apuntes complementarios y proponer un trabajo contextualizado que obligue a entender los conceptos, y a exigirlos posteriormente como materia obligatoria de examen ,cosa que no hice este curso.

Naturaleza e interacciones de la Luz con los cuerpos

El nuevo grupo de preguntas iniciaba el núcleo de las interpretaciones cualitativas a fenómenos ópticos cotidianos que se suponía debían ser mejoradas con la nueva metodología. Algunas las seleccioné de otros autores (Bach, Galili,...) y la mayoría las elaboré yo mismo. Una primera parte incluía los conceptos intuitivos de claridad y oscuridad, ciertos rudimentos de naturaleza de la luz y color de los cuerpos mientras que un segundo entraba más al comportamiento de la luz en prismas y gotas de agua.

18. ¿Puede un espejo reflejar la oscuridad? INDICE GCON = 40 ; INDICE GEXP = 85

19. ¿Por qué necesitamos luz ambiental para ver los objetos? INDICE GCON = 44; INDICE GEXP = 76

20. Sabes que los televisores reproducen cualquier color mezclando adecuadamente el rojo, verde y azul (sistema RGB), y que los artistas lo consiguen mezclando amarillo, cian y magenta en su paleta. ¿ quiere esto decir que la luz natural sólo tiene tres colores? Sí ☐ no ☐ INDICE GCON = 52 ; INDICE GEXP = 92

21. La luz transporta energía: sí ☐ no ☐, solo ondas ☐ no, sólo partículas ☐ INDICE GCON = 60 ; INDICE GEXP = 50

22. La luz blanca ¿es sencilla o compuesta de otros colores? ¿Y la luz roja? INDICE GCON = 81 ; INDICE GEXP = 75

23. Si dos luces, roja y verde se cruzan en un punto y se enfocan sobre una pantalla simultáneamente, se ve un color *magenta* . Si se quita la pantalla, ambos siguen caminos independientes, con colores: rojo y verde por separado ☐ ambos magenta ☐ no lo sé INDICE GCON = 61 ; INDICE GEXP = 77

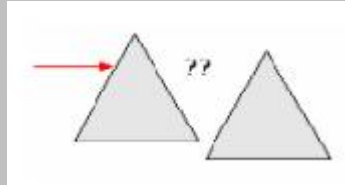
24. Un papel blanco, ¿qué colores refleja de la luz que le llega? ¿ y uno gris? ¿ y uno negro? INDICE GCON = 49 ; INDICE GEXP = 46

25. ¿Qué ocurre cuando un electrón excitado en un átomo baja a un nivel de menor energía? INDICE GCON = 42 ; INDICE GEXP = 54

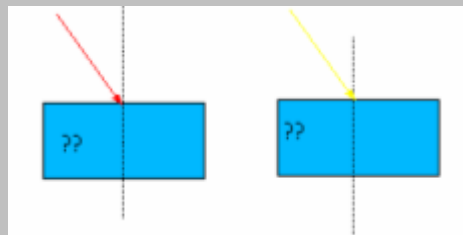
26. ¿En un día nublado, ¿tenemos sombra? ¿cómo lo explicas? INDICE GCON = 47 ; INDICE GEXP = 23

INDICE GLOBAL GCON = 53 INDICE GLOBAL GEXP = 64

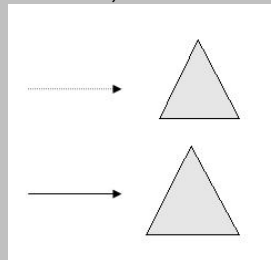
27. Dibuja la trayectoria de un rayo de luz roja que incide sobre un prisma tras el que hay otro segundo prisma. INDICE GCON = 35 ; INDICE GEXP = 77



28. Dibuja la trayectoria (o trayectorias) de un rayo de luz roja y otro blanca cuando inciden en la superficie de un vidrio grueso INDICE GCON = 16 ; INDICE GEXP = 61

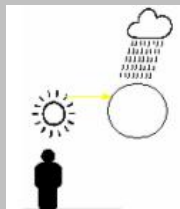


29. ¿Cómo continúa su camino un rayo de luz blanca que llega a un prisma? ¿Y uno de luz roja? INDICE GCON = 26; INDICE GEXP = 87



30. ¿Por qué aparecen colores en un prisma al paso de la luz? INDICE GCON = 81 ; INDICE GEXP = 62

31. ¿Por qué se forma el arco-iris? (haz un esquema de la trayectoria de los rayos en el dibujo de la gota de agua ampliada) INDICE GCON = 26 ; INDICE GEXP = 33



INDICE GLOBAL (I+II) GCON = 45 ; INDICE GLOBAL (I+II) GEXP = 64

LAS RESPUESTAS:

18.- En el GCON sigue apareciendo la idea de que la oscuridad es algo que el espejo puede reflejar. Es un error que no aparece en otras investigaciones. Sí coincide con otras la supuesta permanencia del color de los cuerpos en ausencia de luz..

19.- La luz ambiental no se entiende como resultante de la difusión de la luz solar que, a su vez, incide sobre los cuerpos excitando en ellos la reemisión de ciertas longitudes de onda. Es este el error clave en las preconcepciones detectadas por todos los investigadores que he consultado (Galili, Anderson, Guesne, Driver, etc...)

20. Ya he comentado que la no comunicación entre el departamento de Dibujo en el que se inician a los colores primarios y el nuestro, en el que hablamos de colores espectrales, da lugar a que coexistan las dos concepciones sin integrarse. Nuestro grupo respondió bastante mejor gracias al énfasis que puse en aclararlo.

21.- Una cuestión que suponía trivial y en la que prácticamente no nos detenemos, dio errores apreciables a pesar de lo común de las experiencias con lentes convergentes que pueden quemar un papel, el conocimiento de los dispositivos para captar la energía solar, etc. Sólo se puede justificar en la compartimentación que el alumno hace de los conocimientos que le impartimos: el concepto de la luz que forma las imágenes es diferente para ellos del que causa el Efecto Fotoeléctrico.

22.-Ambos grupos dan aciertos aceptables. Es normal, porque ya les hemos expuesto las experiencias con prismas y aquí no se hace aparecer la alternativa de los colores primarios.

23.- Nuestro grupo ha asumido la independencia de los rayos de luz durante su trayectoria lo que también explica la pequeña ventaja. Es un tema que traté con ellos al referir las objeciones de Huygens al modelo corpuscular.

24.-La confusión es general en ambos grupos, sobre todo en explicar reflexión de la luz blanca en un papel de color gris. Aunque en unas preguntas, parece que la comprensión es correcta, el preconcepto de que los cuerpos son de un determinado color independientemente de cómo se iluminen, persiste cuando se cambia ligeramente el enunciado.

25.-Nuevamente hay un desconocimiento inesperado sobre los efectos energéticos (y luminosos) que acompañan a las transiciones electrónicas.

26.-Aunque no se les ha dado aún el concepto de difusión de la luz (*scattering*) en las gotas de agua de las nubes, los menos lo explicaban como la reflexión de la luz del sol en las gotas de las nubes, lo que consideré como correcto porque habían llegado a lo máximo que podían con sus conocimientos. La mayoría de ambos grupos era incapaz de llegar a ninguna explicación convincente.

27, 28 y 29.- La experiencia nos mostró que cuestiones triviales, sólo se contestan bien cuando han discutido con calma el Experimentum de Newton, dibujado la marcha de rayos simples y policromos en prismas y/o dioptrios planos hasta la saciedad. En este aspecto hay coincidencia total con los hallazgos de Amarjit (1990)

30.- Aunque no se entra en este curso en el mecanismo de la dispersión de la luz blanca, me bastaba con que justificaran el fenómeno refiriéndose a ella. Supuso otro fracaso sin justificación la peor comprensión de este fenómeno en mi grupo puesto que les desarrollé el tratamiento de Huygens de frentes de onda de velocidad variable según su longitud de onda, para la deducción de la Ley de Snell

31.-Me era suficiente que se refirieran a la necesidad de la refracción en el agua para la aparición de este meteoro y, no obstante, muy pocos la vieron. El esquema de la refracción y reflexión del rayo en la gota de agua sólo lo inician dos de mis alumnos a pesar de habérselo comentado en clase y haber realizado la experiencia de cátedra con un matraz esférico lleno de agua sobre el que incidían luces laser roja y verde.

CONCLUSIONES:

Alumnos que resuelven bien los ejercicios de prismas de las PAU, incluso difíciles, como los del ángulo mínimo, fracasan cuando se pasa a contextualizar la marcha de rayos monocromos o blancos en la interfase entre medios refractivos. Corregir esta disfunción pasa por apurar aún más las discusiones del Experimentum de Newton y por redactar una actividad que incluya su resolución exhaustiva. El aspecto energético de la luz asociado a las transiciones electrónicas y a su comportamiento diario, aparece también bastante incomprendido.

Ondas de luz

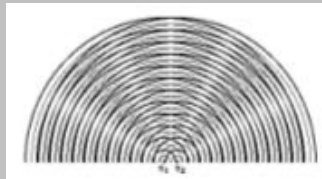
La medida de la comprensión de los aspectos ondulatorios de la luz, la cifré en la predicción de los comportamientos cualitativos y en la comprensión de conceptos como longitud de onda y polarización.

32. Que característica física diferencia un color rojo de otro verde? INDICE GCON = 60 ; INDICE GEXP = 75

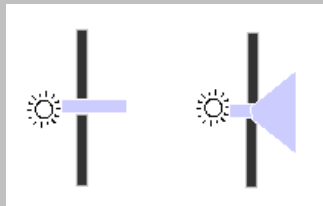
33. ¿Cómo explicas que si dos personas se miran mutuamente ambas puedan distinguir sus imágenes respectivas con nitidez sin que éstas tropiecen por el camino? porque las imágenes están compuestas de partículas que viajan muy distanciadas entre sí ☐ porque se portan como las ondas de agua que siguen su camino independientemente aunque se crucen ☐ otros(explicalo) ☐
INDICE GCON = 65 ; INDICE GEXP = 75

34. ¿Qué es luz polarizada? ¿Cómo la obtienes? INDICE GCON = 12 ; INDICE GEXP = 62

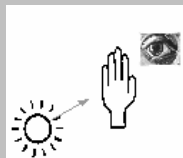
35. Si tiras simultáneamente dos piedras al agua, al cabo de los pocos segundos se ven zonas de máximos y mínimos como las de la figura ¿cómo lo explicas?
INDICE GCON = 26 ; INDICE GEXP = 85



36. Cuando un haz de luz atraviesa una rendija estrecha, ¿cómo es la trayectoria del haz de luz? : sigue paralelo ☐ se abre en un haz ☐ ¿Por qué?
INDICE GCON = 87 ; INDICE GEXP = 54



37. Si cierras dos dedos casi del todo frente a un foco de luz, se ven a su través rayas parecidas a códigos de barra (rayas oscuras y luminosas)¿ cómo lo explicas? INDICE GCON = 10 ; INDICE GEXP = 38



INDICE GLOBAL GCON = 43 ; INDICE GLOBAL GEXP = 65

LAS RESPUESTAS:

32.-Los resultados de ambos grupos a una característica básica como es la longitud de onda, fueron aceptables. Ligeramente mejores en el GEXP.

33.-Esta cuestión, que ya planteó Huygens, tuvo bastantes respuestas correctas. Considero que en este éxito hubo un componente de azar considerable. Justo es que en la ventaja del GEXP influyó que durante una iniciación histórica en Power Point, relaté este tópico a mis alumnos.

34.-Trabajé mucho el tema de la polarización con cristales de Espato, luz reflejada en vidrios y agua con ayuda de gafas de sol polarizadas con las que se eliminaba el reflejo de la pizarra, y con una pareja de polarizador y analizador. Ello justifica la diferencia entre los grupos.

35.-Aquí el resultado es claramente a favor del GEXP. Es lógico puesto que trabajé una colección de fotos de dos piedras cayendo simultáneamente a la superficie del agua de un embalse sobre las que analizaba la situación de las hipérbolas de interferencia.

36.-Aunque todos mis alumnos hicieron observaciones de luces lejanas a través de una rendija de anchura variable, sus resultados fueron inexplicablemente peores que los del GCON. Preguntado el grupo después por este error, trivial para ellos, lo achacaron a que no habían prestado demasiada atención a la pregunta pues formalizaron el cuestionario en casa en fechas próximas a la Selectividad.

37.-Al cerrar más la pregunta, los alumnos del GEXP fueron capaces de relacionarla mejor que sus compañeros con la descripción y experiencias de la difracción que ya conocían.

CONCLUSIONES:

El material humano actual con que trabajamos, tiene en este curso aptitudes e intereses profesionales variados y ello hace que la instrucción que les damos se rentabilice de modo muy distinto. No obstante considero un éxito razonable el que, priorizando las dimensiones histórico-experimentales, se mantenga la diferencia en casi todos los ítems científicos a favor de mi grupo.

Como estrategia de actuación futura, propongo de nuevo que se personalicen aún más las actividades prácticas, los informes escritos para casa y los controles de evaluación que analicen la comprensión de los mismos. El temido examen, planteado comprensivamente, sigue teniendo gran

utilidad para que el alumno ejerza la labor de síntesis y exhaustividad que de otro modo se trabajarían mucho menos.

La Visión

Este ítem, de una gran utilidad para la salud ocular y amenidad en su exposición, es con frecuencia el gran olvidado de la Óptica. En mi intención de medir los conocimientos mínimos que debería tener al respecto el alumno tras mi intervención, elaboré un test que indagara sus conocimientos sobre el cristalino y retina, la identificación de ambos defectos, su evolución a lo largo de la infancia y madurez y la paradoja de la disminución del tamaño de la imagen pequeño

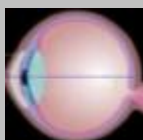
38. En el interior del ojo hay una lente orgánica convergente llamada cristalino que enfoca las imágenes en la retina, tejido posterior del ojo que hace las veces de pantalla. ¿ Se recoge directa ☐ o invertida ☐ ? ¿ Mayor o menor que el objeto real? Mayor ☐ Menor ☐. Haz un esquema de la formación de la imagen de un árbol lejano en la retina INDICE GCON = 66 ; INDICE GEXP = 62

39. ¿Por qué todo el mundo necesita gafas a partir de una cierta edad? INDICE GCON = 39 ; INDICE GEXP = 69

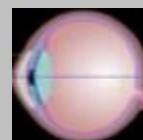
40. ¿Por qué necesitamos un tiempo para distinguir las letras de un periódico un objeto en el suelo? INDICE GCON = 77 ; INDICE GEXP = 77

41. ¿Qué son la miopía y la hipermetropía?. Describe ambos defectos con un diagrama sencillo y la lente que los corrige. INDICE GCON = 25 ; INDICE GEXP = 75

Miope



Hipermétrope



42. ¿Cómo explicas que un objeto grande (una montaña) pueda recoger su imagen y verse en un instrumento óptico pequeño tan pequeño como es el ojo? INDICE GCON = 12 ; INDICE GEXP = 50

GLOBAL GCON = 44 GLOBAL GEXP = 67

LAS RESPUESTAS:

38.-Nuevamente dediqué un tiempo y medios considerables (optotipos, identificación práctica de defectos visuales, manejo de lentes reales, software,...) a la descripción del ojo como instrumento óptico, con un inesperado peor resultado para mis alumnos.

39.- Es una cuestión que si no se les ha explicado antes la pérdida de elasticidad del cristalino con los años, no la sabrán responder. En mi caso lo hice con detenimiento ejemplificando a menudo mi presbicia, aunque no lo exigí para los exámenes, y ahí estriba que mis resultados superen a sus compañeros.

40.- El tema de la acomodación del cristalino, a veces no muy bien expresado, se responde bien por ambos grupos.

41.-En este apartado fui también exhaustivo y, aunque bastante mejores que los del GCON, los aciertos de mis alumnos en una cuestión sencilla no fueron tan exhaustivos como correspondería a la acción didáctica.

42.-La vieja pregunta de los críticos de la teoría intromisiva continuó insoluble para la mayoría de alumnos del GCON. En el GEXP produgué los ejercicios gráficos con regla y compás de construcción de imágenes dadas por lentes y por el ojo como una aplicación, lo que no explica mi fracaso relativo. Deduzco para otras intervenciones trabajar más la dimensión instrumental del ojo.

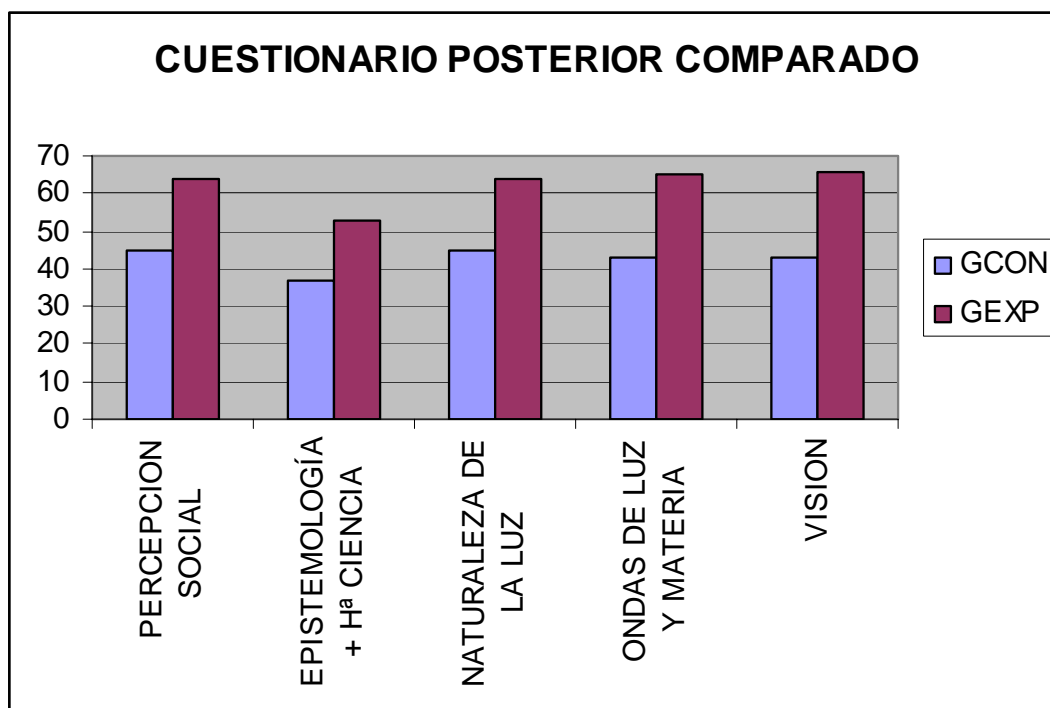
CONCLUSIONES

El tema de la visión tiene un gran potencial educativo porque su explicación resuelve infinidad de dudas con las que el alumno convive a diario y es aconsejable que se integre en el campo cognitivo del alumno. Es una vez más un argumento que ayuda a mi discurso de la necesidad de controlar y valorar lo que se imparte, la contradicción que supone que los alumnos comprendan fielmente las explicaciones y actividades que ellos sabían que no serían evaluables convencionalmente, y sin embargo, las olviden en poco tiempo por no haberlas madurado como materia de examen.

CONCLUSIONES DE LAS ENCUESTAS POSTERIORES A LA ACCIÓN DIDÁCTICA

En todos los ítems se aprecia que las diferencias positivas se mantienen, e incluso crecen, a favor del GEXP. Podemos pues concluir sin triunfalismos que la nueva didáctica funciona mejor aún con referencia a los ítems de conocimientos cualitativos de los fenómenos convencionales.

Una breve respectiva nos confirma de modo global el resumen de la evaluación.

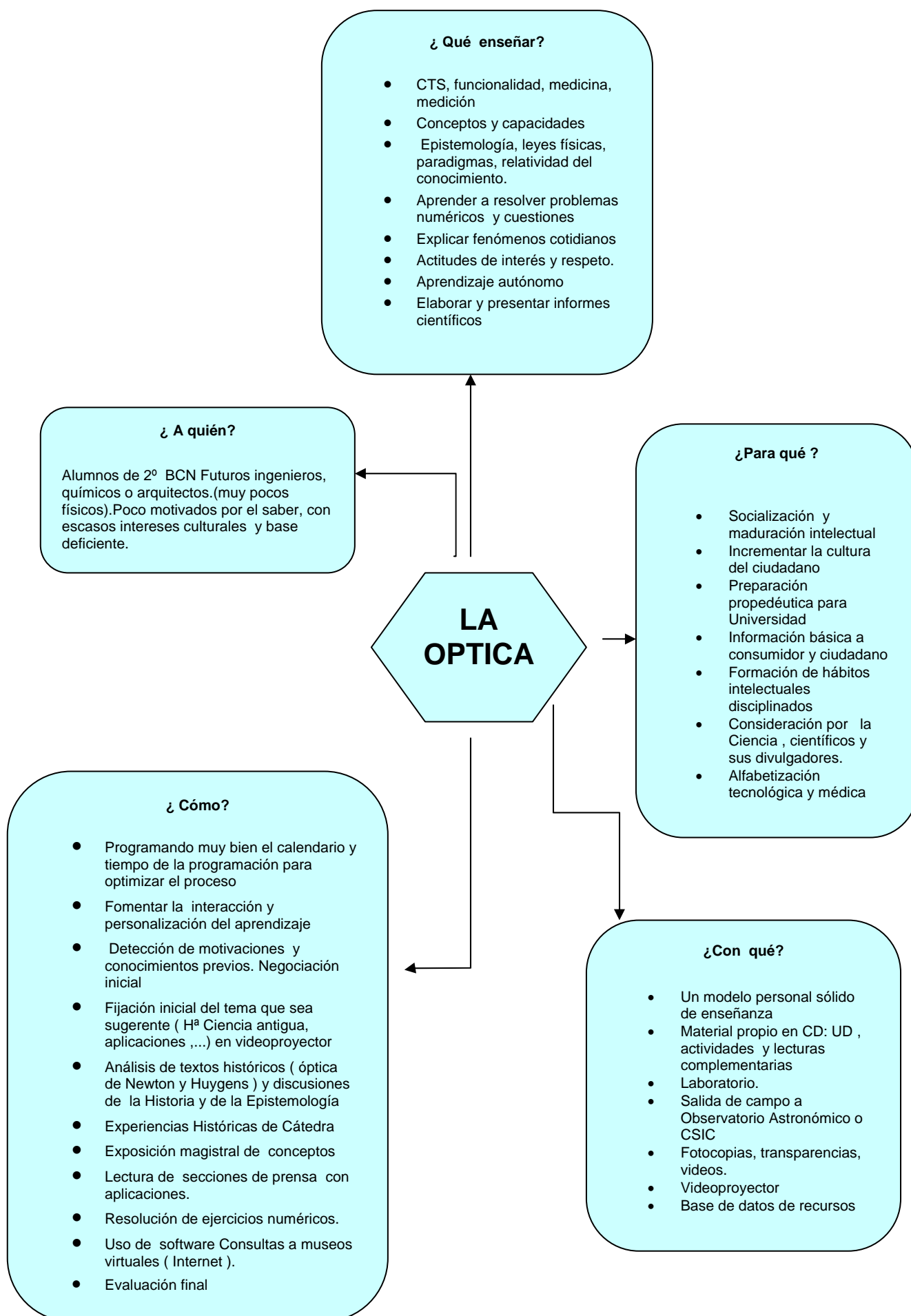


3.7 Elaboración y aplicación de la Unidad Didáctica

De mi propia experiencia de años de docencia y de las manifestaciones de otros compañeros, obtuve la conclusión de que el tema de la Óptica tiene apartados que se oscurecen cuando aparecen las interpretaciones ondulatorias, más apropiados para ser tratados en niveles universitarios. De la misma experiencia y de los formularios que pasé a alumnos de distintas edades (ver resultados de cuestionarios a alumnos), constaté que los alumnos:

- Tienen carencias imputables a un sistema que no les hace asumir la necesidad del esfuerzo hasta el último curso de Bachillerato, como ellos mismos manifiestan.
- Consideran motivadoras las biografías de científicos pero se oponen a su exposición en el segundo curso de Bachillerato debido a la presión de la Selectividad.
- Tienen carencias de lenguaje matemático importantes, los que les hace muy difícil abstraer las conclusiones físicas de los resultados de los desarrollos.
- Vienen acompañados de ideas previas, comunes en ocasiones a muestras numerosas de población.
- Encuentran tópicos realmente difíciles de aprender a pesar de que se haya insistido en su tratamiento.
- Consideran motivadores los aspectos experimentales de la materia porque les amplía comprensión de los conceptos.
- Llegan con una ignorancia que mantienen con pertinacia bien a pesar de que se haya intentado corregirla en los temas de epistemología básica como son el significado de principio, ley física, teoría, modelo, etc.
- Conectan con mucha dificultad los problemas reales con los conceptos teóricos que ya poseen, clave para su interpretación.

El conocimiento de estas consideraciones entró en dialéctica con mis preferencias personales a la hora de la propuesta. Aún manteniendo los aspectos convencionales, tuve que dosificar muy bien la componente histórica para mantener el interés del grupo. El siguiente diagrama resume la concepción didáctica que subyace en la propuesta:



3.7.1 Los objetivos

A las puertas de una nueva ordenación, poco hay que añadir a los que prescribe la vigente ley con bastante mayor acierto (BOCM, 2 abril, 2002) que los textos al uso.

Expresándolo en un lenguaje más directo, buscaba un alumno que :

- Entendiera un poco de la filosofía de la Ciencia, de su lenguaje, del objeto de su atención y supiera de sus crisis.
- Fuera capaz de identificar los mecanismos cualitativos subyacentes a los fenómenos físicos e instrumentos con los que convivimos.
- Interiorizara estrategias de los científicos para abordar el estudio de los problemas.
- Interiorizara las matemáticas y conceptos básicos con la profundidad suficiente para que apoyasen la construcción de otros más complejos.
- Mostrase una actitud permanente de interés y respeto por el conocimiento.
- Una vez adulto alejado de la Ciencia, hubiera adquirido una comprensión de los objetivos, sociología y métodos de la ciencia más amplios que en los convencionales.
- Conociera las instituciones y los canales de la Ciencia

3.7.2. Los contenidos

La consideré el eje de la acción. En la intención de que la experiencia fuera una referencia para las EEMM, autosuficiente y coherente con los programas oficiales, decidí desarrollar la Unidad en cuatro capítulos. Desde mi perspectiva cotejada con las fuentes referidas, opté por cinco apartados clave en el desarrollo de la unidad a cuya adquisición hay que aplicar una intensidad especial: los gráficos en la construcción de imágenes de lentes y espejos, el desarrollo geométrico y trigonométrico de las interferencias, la reflexión difusa y especular, la dispersión de la luz, el concepto de coherencia, el principio de Huygens-Fresnel y la visión del color. Mientras que los dos primeros se pueden enfrentar sin demasiadas dificultades, los últimos solicitan una atención especial desde distintas actividades, pasando por su exposición inicial, su desarrollo histórico y su ejemplificación en casos concretos. Su descripción superficial centra la propuesta:

- **Óptica de Rayos:** parecía el tema menos interesante, pero decidí revalorizarlo por ser la base de toda la unidad. Su utilidad para el uso de los instrumentos ópticos de uso frecuente en la vida usual y para la primera interpretación de sus procesos le dan un protagonismo que se le sustraía hasta hace muy poco. Pretendí una recopilación exhaustiva de los ítems

básicos sin llegar a profundizar en las distorsiones ni al uso de los diafragmas. Incidí en la reflexión (especular y difusa) y en la formación de sombras. Hice referencias frecuentes a la historia de sus orígenes, siempre asociados con los de la visión, porque el tema ilustra mejor que ninguna disciplina la evolución de los modelos y del carácter colegiado de la ciencia.

- **Vibraciones y Ondas:** aparte de su interés intrínseco, no se puede entender la óptica ondulatoria sin el bagaje trigonométrico básico y la identificación física de sus parámetros. El tema de ondas mecánicas, tradicionalmente de una comprensión difícil, lo entendí como imprescindible para la comprensión tanto de los parámetros matemáticos como para la fenomenología de las perturbaciones mecánicas y ópticas necesitada de un proceso de aplicar con ciertas reservas las analogías entre ambos fenómenos. Lo imprescindible de un medio transmisor para las primeras es un obstáculo en el uso de la citada analogía de muy difícil superación.
- **Óptica Física:** La didáctica de la óptica física es la mejor ocasión del temario para ejemplificar tópicos como paradigmas, hipótesis y teorías científicas. Es un tema en el que el legislador sólo sugiere (con acierto a mi entender) el tratamiento fenomenológico y epistemológico, dejando para cursos universitarios la aplicación de los algoritmos. Introduje en ella el tema de óptica ondulatoria con cierta consistencia cerrando con las aportaciones de Fresnel, y el de óptica electromagnética con muy breves apuntes. Dado el carácter didáctico del proyecto y tras mi convicción de años de que las ecuaciones de Maxwell son totalmente inapropiadas en estas edades (alguien dijo que eran dignas de un Dios), procuré volcar las tintas en el principio de Huygens- Fresnel y sólo a título informativo, para que se entendiera que el difícil tema de la difracción sólo explica el *cómo* pero no da explicaciones contundentes al *porqué*, expuse algunos desarrollos. Decidí cierta exhaustividad en la presentación, realización y discusión de las experiencias históricas por la potencia que tienen tanto en la presentación de conceptos nuevos como en la relativización de las teorías científicas.
- **Visión de la Forma y el Color:** Es un tema que los textos dejan de lado, dando la impresión al alumno de que tienen también una entidad menor. En todos ellos observo una ambigüedad en la relación entre colores primarios y espectrales puros, a la que colaboran algunos de nuestros compañeros de Dibujo por su desconocimiento de la fisiología de los tres tipos de conos de la retina. A fin de ayudar al conocimiento de la salud ocular del consumidor, le dí una dimensión nueva a los defectos refractivos del ojo al incluir las

clases de test utilizados. Dentro del tipo de actividades en la frontera de la Física, inicié las perspectivas electromagnética y cuántica del color (espectros y cuerpo negro). Un apunte muy breve al Optometrista Daza de Valdés, nuestro científico más internacional hasta el siglo XX cerraba el tema.

3.7.3 La metodología

A pesar de la citada servidumbre de las pruebas PAU, pretender una visión más social de la ciencia, fruto de la experiencia y los paradigmas, sin verdades definitivas y resultado de vaivenes, condicionaba modificaciones en la metodología y en los materiales: En la propuesta, además de los conocimientos y procedimientos científicos recomendados, debía de haber historias de los científicos, tiempos para elaborar informes individuales, oportunidades para las discusiones epistemológicas sobre la potencia de los *Experimentum Crucis* y provisión de las capacidades necesarias para interpretar fenómenos inmediatos, aspectos que en las programaciones convencionales se resienten. Las orientaciones oficiales dan libertad al docente aunque fomentan explícitamente el modelo constructivista que en este curso se me antoja poco realista por los condicionantes del tiempo

Sabedor de que nuestra materia puede llevar con mucha frecuencia al aburrimiento del alumno, procuré orden, amenidad, perspectivas del pasado y el futuro, y rigor en las explicaciones. El referido análisis los textos del mercado, me sirvió para emular el método japonés en sus inicios del desarrollo industrial, cuando copiaban la tecnología fotográfica de las marcas *Leika* y *Kodack* que luego mejoraron: cribé las actividades más pertinentes para mejorar la interacción de los alumnos y añadí algunas nuevas que redundaron en una mejora de la acción didáctica. Lo que distingue a esta propuesta de otras es la dimensión histórica de las ideas científicas desarrolladas y la profusión de actividades experimentales.

- Propuesta inicial al grupo en la que se expone la planificación del tema, el mapa conceptual (Novack, 1998) y la forma y herramientas de evaluar. Tras ello se les entregó el CD y los impresos para la cumplimentación de un formulario de concepciones previas que se hace en el aula
- Sesiones magistrales de quince minutos en Power Point con un acercamiento histórico a los hitos relacionados con cada uno de los bloques más importantes seguidos de los comentarios sobre la epistemología implicada. (**PP**) en la secuencia)
- Exposiciones magistrales interactivas en las que se desarrollan los tópicos científicos precedidos de una corta introducción epistemológica, histórica o experimental. (**CMI**).

- Sesiones dedicadas a la reproducción de Experimentum Crucis (**EC**) y su posterior discusión.
- Clases de resolución de ejercicios convencionales y de asentamiento de conceptos (**RE**).
- Elaboración por el alumno de informes comentados sobre textos históricos de la evolución de las ideas, y/o de biografías contextualizadas de científicos (**IC**).
- Sesiones de exposición en Power Point de los trabajos de los alumnos (**PP**).
- Controles de ejercicios convencionales.
- Exposición de textos antiguos, revistas científicas o divulgativas y recortes de noticias en las que la ciencia tiene relevancia. La entendería como *ciencia viva* (**CV**).
- Sesiones discutidas de análisis o discusión de textos históricos. (**HC^a**)
- Propuesta de cuestiones para casa, en las que se apliquen los conceptos a la interpretación de situaciones de la vida diaria. (**PC**)
- Propuesta de direcciones de Internet para trabajar en casa
- Manejo de programas de software en versiones “demo” de simulación de fenómenos ópticos (**SD**).

3.7.4 Los recursos

Los planifiqué para su aplicación en varios tipos de actividades:

- Decidí instalar en la pared del laboratorio una colección de retratos de los científicos más destacados, a los que me refería brevemente al inicio de los temas que los relacionaban.
- Un sencillo video-proyector, constituyó un apoyo inestimable al que acudí con frecuencia para las referidas presentaciones iniciales.
- Dado el vacío de material histórico divulgativo y lo gravoso para las economías familiares del existente, decidí elaborar unas ‘*Lecturas de Óptica*’ en formato digital que fuera la referencia de todas las actividades históricas que se proponían en la unidad didáctica que era el guión de toda la actuación. Tanto estas historias como la Unidad Didáctica con su programa y ejercicios para casa, se entregaron a cada alumno en un CD. Las características de este medio permiten democratizar el aprendizaje pues sería impensable conseguir de otro modo tanta profusión de imágenes y material como incluí en él. Lo económico del medio me sugirió la posibilidad de extender su uso a estudiantes universitarios de los primeros cursos y subir el nivel científico de las historias complementarias. Su elaboración supuso una fase densa de documentación con ayuda de los textos antiguos y de divulgaciones actuales. El trabajo lo cerré en tres capítulos: el

primero entre la época griega y Kepler, el segundo desde Snell hasta Huygens y el tercero desde Young hasta Fresnel cerrado con la síntesis electromagnética de Maxwell y Hertz.

- De otra parte, para la reproducción de los experimentos históricos, hube de construir montajes sencillos necesitados de cierta habilidad experimental, pensados *ad hoc*, como telescopios, rendijas de difracción, montajes para interferencias en películas de aceite y aire, y bastidores con rendijas para observar la difracción de luz de una vela en un cabello, bastidor con lámparas monocromas (sodio a baja presión), dobles rendijas, polarizadores con espejos, cajas para mezclas de colores, etc. La adquisición de dos láseres de distintos colores y de una caja paralelepípedica de vidrio en la que introducía agua teñida, fue definitiva en la comprensión de la refracción, dispersión y arco iris.
- La fotografía digital supuso un impulso, tanto para el registro de las actividades en el laboratorio, como las externas entre las que destaco las ondulaciones en el agua tras la caída de dos piedras al unísono, las manchas de aceite en el asfalto de los días lluviosos, la distorsión de las lentes, la difracción de la luz de una lámpara, los fenómenos meteorológicos como el arco iris, etc.
- La lectura de los textos antiguos en las Bibliotecas y en Internet fue el eje personal de la investigación y el más arduo por lo que supuso desentrañar los lenguajes antiguos de exposiciones que un relato actual nos comunica de inmediato.
- La consulta a los textos actuales tanto en los niveles de EEMM como Universitarios en la búsqueda de ese equilibrio entre lo justo y lo superfluo para estos niveles, así como la nueva perspectiva que hiciera más comprensible el fenómeno.
- Los programas informáticos en su doble vertiente: como medio de diseño gráfico (*Star Office*, *Raytrace*,...) y como simulador de fenómenos (*Crocodile*, *Data Studio*, *Winlens*, *Cabri*,...)

3.7.5 El lenguaje y el estilo de la Unidad Didáctica

Tras consultar varios textos nacionales y extranjeros, me siento en deuda con los clásicos americanos de Física General universitaria (Sears, Tipler, Serway, Halliday- Resnick,...) y con algunos proyectos de la Red de Internet (Cromwell, 2000), de donde adapté la presentación de la secuencia de los conceptos en una columna que dejaba un margen para las imágenes comentadas. Las rupturas que suponían las actividades se incluían en tablas y cuadros de texto claramente diferenciados.

Tenía claro que la expresión y desarrollos debían ser bastantes asequibles para que el texto fuera autosuficiente para el alumno normal y de ahí la exhaustividad de algunos desarrollos. En los casos en que sólo quería el aprendizaje del algoritmo o apuntar fronteras lo decía explícitamente a riesgo

de perder la elegancia y sobriedad que tanto se valora en ocasiones .A fin de mantener el interés, la presentación debería presentar rupturas intercaladas con aspectos funcionales, ejemplificaciones, relato de experiencias, secciones de ejercicios resueltos, Física ampliada, contexto histórico de las ideas o ejercicios resueltos.

Le dí un peso muy fuerte al lenguaje de las imágenes (Pintó & Ametller, 2002) por considerar que reducen la ambigüedad a la que a veces induce el lenguaje escrito en adolescentes cuya capacidad de abstracción es aún deficiente. El uso del software actual de diseño gráfico (*Star Office, Excel,...*) permitió optimizar la presentación incluyendo, ya fueran imágenes externas modificables, diagramas de estadísticas, diagramas de flujo y dibujos originales con calidad profesional. De otra parte, el software científico interactivo (*Crocodile, Cabri, Win Lens, Raytrace, Data Studio* y los *apples* que se pueden encontrar en la red) permitía tanto la simulación dinámica, útil en cuanto complemento de la experiencia real, como el registro gráfico de los

Programé una visita al Observatorio Astronómico del Retiro de Madrid cuyo contenido sintonizaba más con los tópicos de gravitación que con los de óptica, pero lo cuidado de sus instalaciones dio una perspectiva histórica al estudio de los telescopios refractivos.

Incluí, finalmente, dentro del capítulo de óptica física de la UD, el desarrollo de algunos Experimentun Crucis, como las actividades colofón de cada apartado. A partir de ellos se catalizaban las síntesis del proceso de estructuración del cuerpo cultural y científico del estudiante.

3.7.6 El desarrollo de la Unidad

Aunque más adelante (ver anexo VI) expongo una secuenciación pormenorizada de las acciones proyectadas que se llevaron a cabo en su mayor parte, considero que procede también la descripción de los aspectos de aula más concretos que la acompañaron.

Tras bastantes dudas acerca de si comenzar con un criterio epistemológico como había hecho otros cursos por las ondas mecánicas , seguidas por la Óptica Física y finalizar con la Óptica Geométrica y la Visión, el curso pasado 2006/07 decidí invertir la secuencia primando los aspectos psicológicos e históricos

Tenía que impartir docencia a un grupo de nueve alumnos en diurno de los que tres eran de un nivel notable alto-sobresaliente, muy interesados en su buena nota de Selectividad para acceder a Arquitectura, Medicina y Caminos, dos de suficiente-bien, indecisos con su futuro, dos de suficiente muy justo, uno con muy mala base (aprobado en septiembre) y otros dos tenían la Física y Química de primero de Bachillerato pendiente. Como era de esperar, los dos últimos se descolgaron a poco de la experiencia. En nocturno tenía tres alumnos con un historial de fracaso

académico anterior: uno de ellos procedía de la modalidad de Diversificación que al final se decantó hacia un módulo de Educación Física, otro, realmente inteligente, tenía habilidad especial para las manipulaciones mecánicas y la informática, pero una aptitud nula para los desarrollos matemáticos, y la tercera una chica que repetía el curso y cuyas inquietudes profesionales iban hacia un módulo de alimentación. Los tres arrastraban deficiencias en el seguimiento y reproducción escritos de los algoritmos matemáticos largos. Con estas condiciones humanas de partida, un programa muy apretado en el tiempo, la posibilidad de una mejor atención dado lo reducido de ambos grupos y la posibilidad de que todas las sesiones se impartieran en el laboratorio donde disponía de un video-proyector, decidí abordar la experiencia con unas expectativas no muy optimistas.

Iniciado el curso con la Óptica Geométrica, comencé la primera sesión con una breve exposición de las características del curso, mi papel y el de ellos en una especie de contrato en el que cada parte conocía sus márgenes de actuación, la programación general del mismo y el proyecto de desarrollo de una experiencia piloto del que esperaba su complicidad. A continuación les entregué el formulario inicial (ver anexo I) para cumplimentar en clase, en el que pretendía averiguar los preconceptos al respecto.

La siguiente sesión la inicié con una breve biografía de la colección de científicos cuyas fotografías adornaban el aula, seguida de la primera presentación audiovisual de los temas de visión y óptica de rayos desde la antigüedad hasta Descartes. Hice de la referencia histórica rápida a cada científico e idea, de la profusión de imágenes, del diálogo heurístico y de la evidencia experimental inmediata, una constante en el desarrollo del curso.

Reciente el eclipse de 2005 cuyas sombras en el suelo a través de las hojas de los árboles observamos en el centro, ejemplifiqué el modelo de rayos con fotografías de aquella jornada y con el ejemplo de la cámara oscura cuya construcción encomendé a dos alumnos. Un estudio con cierto detenimiento de la misma, debería ayudar a la superación de los errores registrados en la concepción estática de la luz, en la reflexión difusa y en la formación de sombras y penumbras.

Tras esta sesión inicié el estudio de los espejos planos ayudado de un puntero Laser y dos espejos pegados en respectivas tablas unidos en bisagra, lo que permitía analizar el distinto número de imágenes y la inexistencia de una imagen real tras ellos susceptible de ser recogida en una pantalla de cristal traslúcido. Continué el estudio de los espejos esféricos ayudado de una vela y un espejo de tocador, analizando tanto las distintas imágenes reales e invertidas así como las virtuales y directas que se formaban. Tras la sensibilización inicial informé de la posibilidad de adquirir versiones *demo* de software de óptica en Internet y ejemplifiqué su uso. Dos sesiones se dedicaron a la resolución en clase de ejercicios gráficos con regla, papel y compás.

El día siguiente lo dediqué al desarrollo magistral de las fórmulas de los espejos y a la realización de ejercicios. Propuestos para casa ejercicios similares, se resolvieron en las jornadas siguientes.

Le di a la ley de Snell una importancia especial gracias a la cubeta estrecha de cristal cerrada por su parte superior a excepción de un pequeño agujero por el que introducía agua y humo que me permitía ver la trayectoria de rayos *laser* rojo y verde. La variación del ángulo de incidencia medido por un alumno permitía no sólo la visualización del ángulo de incidencia sino la distinta distribución de intensidad luminosa en los tres rayos. Como aplicación inmediata a la explicación del arcoiris, un matraz esférico lleno de agua simulaba la gota de lluvia en la que incidía el rayo luminoso de distintos colores. Tras la comprobación experimental, continué recordando el escenario histórico de Snell y Descartes y la resolución de problemas de láminas paralelas. Un primer control escrito exigió un estudio inicial y la fijación de los tópicos iniciales.

Tras la aplicación sucesiva de la citada ley a interfases de vidrio, establecí las fórmulas de las lentes. La obtención experimental de imágenes reales y virtuales de una vela con lentes convergentes y divergentes, la estimación cualitativa de su potencia y aumento, seguida de simulaciones con el programa Crocodile, consiguieron un interés apreciable. Conocedor de la dificultad que para ellos suponía la reproducción de los desarrollos, preferí centrarme en las fórmulas finales, el convenio DIN para los signos y su aplicación a la resolución de ejercicios numéricos y gráficos similares a los de Selectividad a los que dediqué dos sesiones. El desarrollo de la lupa y de su aumento les resultó de comprensión bastante difícil. Si a ello se añade la dualidad de definiciones de algunos textos, la complicación es aún mayor. A fin de no dejar lagunas, ejemplifiqué este tópico con la visualización de imágenes dadas en su foco por lentes cuentahílos y de relojero. Aunque parecía haber despejado las dudas, se demostró ser un error persistente merecedor de más atención en acciones posteriores.

El paso siguiente a los montajes con varias lentes, lo ejemplifiqué también tanto con lentes móviles como con las construcción de dos telescopios Astronómico y Terrestre. Supuso para todos algo sorprendente la formación de la imagen aumentada e invertida a cuya justificación debimos dedicar cierto detenimiento. Nuevamente continuamos con la resolución de ejercicios y cuestiones similares a los de las pruebas PAU.

Cerré el tema con la propuesta de una actividad para realizar en casa inspirada en el currículo francés que describo en cierto detalle en la UD. Con sólo una caja de zapatos, una lente convergente que se puede obtener en los establecimientos de optometría, y un trozo de papel vegetal, es posible construir un modelo muy sólido de la óptica de rayos: imagen virtual, campo de

visión, tamaño aparente,...Me resultó especialmente interesante porque permite además reproducir el proceso científico desde el enunciado del problema, la emisión de hipótesis, el diseño experimental, la conclusión y el establecimiento de un nuevo modelo. Lamentablemente la propuesta no prosperó y hube de contentarme con exponer el modelo más elaborado que yo mismo había construido. Si bien es cierto que les resultó una demostración instructiva, quedó atrás el intento de fomentar la creación de modelos, su discusión, etc. que me parecían especialmente útiles. La repetición de la experiencia merece más tiempo, mejor planificación y (quizás) alumnos más maduros.

Un control escrito de toda la Óptica Geométrica puso en evidencia que aunque los conceptos se entienden sin demasiado problema, tenían errores en la aplicación de los signos, en el desarrollo de las expresiones largas (operaciones y fórmulas) y en la interpretación de las imágenes.

El tema de ondas mecánicas lo inicié, con un estudio previo del MAS y de la ley de Hooke. El concepto de la fase inicial de un MAS y la elección del origen de tiempos, me supuso un énfasis especial. Un primer control de estos tópicos me ayudó a fijar las trigonometría básica, para ellos novedosa. Tras ello, conforme a mi propuesta con la ejemplificación de ondas longitudinales y transversales con muelles de juguetería en una clara inspiración con el PSSC y con el uso de cubeta de ondas de agua. El porqué del signo distinto en la propagación de una onda a izquierdas, el principio de interferencia o las pulsaciones, la refracción y reflexión de las ondas mecánicas, son cuestiones que recuerdo como difíciles y a las que dediqué también un esfuerzo importante. Nuevamente propuse varios ejercicios similares a los que aparecen en las PAU donde se identifican los parámetros de una onda, las condiciones de interferencia constructiva, etc. Un nuevo control ayudó a fijar en parte las ideas.

Del estudio del sonido hice un tratamiento clásico como ejemplificación de una onda mecánica longitudinal que se mueve con una velocidad finita. Tras la transducción y visualización en un osciloscopio de la intensidad, tono y timbre, el uso de diapasones y software simulativo que ejemplificaba las interferencias y pulsaciones, centré el estudio en sus aspectos energéticos : sensación sonora, intensidad y potencia. El uso de un sonómetro comercial confirió al tema una dimensión de usuario. Las exigencias de la Selectividad obligaron a un desarrollo exhaustivo de ejercicios tipo tanto en casa como en el aula.

Las relaciones históricas las atendí relacionando las interferencias sonoras de Young con las que observó Newton en las mareas de Basha, próximo a Hanoi, expuesta en una lectura. El control, que como todos acumulaba materia anterior, comenzó a seleccionar a los alumnos entre los que podían seguir el ritmo y los que necesitaban una recuperación de mínimos.

Acorde con mis concepciones sobre la didáctica de la óptica física, la inicié con una presentación audiovisual que recogía las polémicas de Newton y Huygens. En la misma sesión reproduje el Experimentum Crucis del prisma de Newton, dirigiendo un haz de luz blanca filtrado de un retroproyector con dos cartulinas hacia dos prismas sucesivos, lo que supuso una especial interacción con la clase. La citada reproducción acompañada de su discusión histórica, erradicó definitivamente la multitud de errores sobre la dispersión de la luz blanca volcados en los cuestionarios iniciales. Tras ella inicié el tratamiento ondulatorio de los haces de luz poseedores de frecuencia, longitud de onda y fase. Aplicando estos conceptos a ejercicios de láminas paralelas y prismas, se obtenían los distintos ángulos de desviación. La resolución de estos ejercicios numéricos (los únicos del capítulo) resultaron de difícil ejecución para los alumnos: nuevamente se constata que nuestros alumnos arrastran deficiencias muy graves en la adquisición de los procedimientos de construcción y uso de lenguajes matemáticos.

Tras los desarrollos matemáticos, una vez finalizada la primera evaluación, dediqué las sesiones anteriores a las vacaciones de Navidad (en las que tradicionalmente se ralentiza el ritmo de las clases) a reproducir las experiencias históricas que relato en la secuencia de sesiones (anexo VI): anillos de Newton, interferencias con un cabello, difracción en rendijas sencilla y doble y la mancha de Arago. Recuerdo especialmente ésta, en la un alumno, al ser preguntado por la causa de la aparición de la mancha central luminosa, la justificaba como que el rayo de luz, ¡atravesaba la bola de acero!... Una tercera sesión en Power Point centrada en las aportaciones de Young y Fresnel (ver anexo VIII) destacaba las aportaciones del nuevo paradigma ondulatorio.

Para el inicio en tratamiento de la polarización de las ondas luminosas me sirvió la clásica experiencia en la que un muelle muy largo (unos 5 metros) que vibra circularmente se hace pasar por una rendija lineal practicada en un cartón: tras ella sólo queda la onda transversal vibrando en el plano que delimita la rendija. Continué con la observación de imágenes dobles a través de un cristal de espato de Islandia y con la observación de los reflejos del cielo y el agua a través del cristal de las calculadoras. El uso de mis propias gafas de sol de cristal polarizado para eliminar el reflejo de la pizarra resultó una estrategia clave para fijar este aspecto de la vibración. Tras ello, situé en el tiempo las contribuciones de Malus y el uso que de ellas hicieron Fresnel y Young para postular la revolucionaria hipótesis acerca del carácter transversal de las ondas luminosas. Una última presentación multimedia sintetiza el camino hasta las ondas electromagnéticas.

El tema de la Visión lo abordé tras la descripción fisiológica del ojo como instrumento óptico, y el análisis y corrección de sus ametropías mediante los test oportunos (optotipos) que tenía en el aula. Utilicé la estrategia del diagnóstico colectivo y del análisis de las gafas de cada alumno. Resultaron sorprendidos de que un simple análisis visual de las mismas detectara cristales para miopes, astigmatas e hipermetropes. En otras ocasiones estos optotipos me han servido para

detectar miopías tempranas y astigmatismos acusados, responsables con frecuencia del fracaso escolar de alumnos cuya atención se centra en un entorno de dos o tres metros. Su comprensión fue bastante lograda. Sin embargo, el análisis de la percepción del color y de las postimágenes, relacionado con las mezclas sustractivas y aditivas de colores se hizo demasiado rápido como para que su aprendizaje fuera significativo. Debido a la premura de tiempo, no hice control formal de este capítulo

3.7.7 La evaluación de los alumnos

Desde años, el modo en que hacemos el diseño de las clases y la evaluación en la materia de Física de 2º de Bachillerato en nuestro centro, se ha dirigido hacia la preparación de la Selectividad, sazonado de historias puntuales de científicos y experiencias ilustrativas. Las pruebas de evaluación se inspiraban fundamentalmente en la colección de las PAU de otros años, lo que es cómodo para el docente pues marca muy bien tanto la metodología como el nivel a impartir.

Cambiar la dinámica con el grupo de alumnos predispuestos contra las novedades, hacia temas humanistas en la programación, me supuso un reto incómodo que al final superé con una fórmula ecléctica: el núcleo de los contenidos de la materia y su calificación, se darían y controlarían por el sistema tradicional pero se daría una calificación complementaria de un punto en la nota final, a los que elaborasen un trabajo individual voluntario sobre temas histórico-epistemológicos de la óptica y la visión, o pequeñas investigaciones de la misma índole. La documentación la extraerían de las lecturas de óptica que adjunto en formato digital y de Internet. Todos los alumnos del grupo excepto dos aceptaron la fórmula.

Cuando quise evaluar el poso que había quedado después de unos meses del desarrollo de la UD, la encuesta posterior (ver anexos) demostró un conocimiento aceptable de los tópicos de refracción, dispersión y visión en clara ventaja con sus compañeros del GCON pero evidenciaron un desconocimiento tan lamentable de los temas epistemológicos como ellos. Deduje de ello que para otras ediciones de la experiencia que habría que incluir en la UD un resumen de estos tópicos y exigirlos además en los controles escritos, lo que les habría ayudado a mejorar su comprensión de los mismos.

No he considerado pertinente para este informe incluir los resultados de los controles convencionales, pero sí destacar que ambos grupos no vieron mermada su formación convencional y hoy están totalmente integrados en las enseñanzas profesional y universitaria. A fin de ilustrar este informe, adjunto dos tablas con las calificaciones Selectividad y los estudios actuales (curso 2007/08) de los alumnos que se integraron en la experiencia.

ALUMNOS TURNO DIURNO 2006/07 IES GREGORIO MARAÑÓN

ALUMNO/A	CALIF. F ^a . 2º BCN	CALIF. F ^a . JUNIO SELECT.	CENTRO 2007/08
J.M	SOBRES.	SOBRES. 9	ETS ARQUITECTURA
R. R.	SOBRES.	NOT. 8	MEDICINA
F. C.	SOBRES.	NOT. 7,5	ETS ING. CAMINOS
L. E.	BIEN	BIEN 6	EU ARQUITECTURA TECNICA
C. Q.	BIEN	SUFIC. 4	CIENCIAS FÍSICAS
A.R.	BIEN	INSUF. 4	ETS ING. INFORMÁTICA
M.S.	BIEN	INSUF. 4	EU ING. TEC. INDUSTRIAL
C.P.	SUFIC.	INSUFICIENTE 2	FP 2º GRADO
J.G.	SUFIC	INSUF 4	EU ARQUITECTURA TECNICA

ALUMNOS TURNO NOCTURNO 2006/07 IES GREGORIO MARAÑÓN

ALUMNO/A	CALIF. F ^a . 2º BCN	CALIF. F ^a . JUNIO SELECT.	CENTRO 2007/08
A.M.	SUFIC.	NP	MODULO 2º GRADO INFORMÁTICA
A:G:	SUFIC.	NP	MÓDULO 2º GRADO EDUCACION FISICA
L.B.	BIEN	NP	MÓDULO 2º GRADO ALIMENTACIÓN

3.7.8 La secuencia de la acción

Visto el programa, y la frecuencia semanal de la materia, he calculado unas 120- 140 horas lectivas, las sesiones de clases, exámenes y recuperación. Comenzando en septiembre, aunque la programación estaba prevista para un total de 46 horas para los cuatro capítulos, lo que supondría finalizar en diciembre, el hecho es que sólo se cerró a finales de enero: so pena de un fracaso

escolar, tuve que dedicar muchas sesiones a resolución de problemas y ser menos exhaustivo en los desarrollos teóricos. No obstante, fue posible formalizar mis objetivos razonablemente.

CAPÍTULO	HORAS PREVISTAS CON RENDIMIENTO ÓPTIMO
OPTICA GEOMÉTRICA	17
VIBRACIONES Y ONDAS	9
OPTICA FÍSICA	14
VISIÓN DE LA FORMA Y EL COLOR	6
GRAVITACIÓN I	10
GRAVITACIÓN II	10
MAGNETOSTÁTICA	12
CORRIENTES INDUCIDAS	8
RELATIVIDAD	2
EFFECTO FOTOELÉCTRICO	2
RADIOACTIVIDAD	2
TOTAL	92

3.8 Elaboración y aplicación de las lecturas de óptica

Dado el vacío de material histórico divulgativo, la pérdida de tiempo que supondría para los alumnos la consulta de las fuentes originales en las bibliotecas especializadas y lo gravoso para las economías familiares del existente en las comerciales, decidí elaborar una historia de la óptica en formato digital que fuera la referencia de todas las actividades históricas que se proponían. Sin ellas la Unidad no habría tenido el aroma histórico que buscábamos y la experiencia no hubiera sido viable. Aceptada esta labor, su elaboración supuso una intensa búsqueda de material histórico, el conocimiento y selección de software educativo pertinente, y la valoración que otros profesores daban a las didácticas basadas en la historia de la ciencia.

3.8.1 Los objetivos

A la hora de su redacción en 177 páginas bastante densas, soportada por obras de otros divulgadores y por la lectura de los autores originales, pretendí:

- Priorizar la comunicación de la historia de las ideas sobre la de los científicos.
- Ejemplificar paradigmas y epistemologías contextualizados en sus vaivenes históricos.
- Destacar las luces de los científicos (conscientes de la deuda con sus antecesores, buscadores del saber exhaustivo no utilitario,...) mucho más fuertes que la de sus sombras explícitas en las disputas de protagonismo de los descubrimientos o en sus etapas personales estériles.
- Procurar una amenidad no exenta de rigor en algunos tópicos científicos que considero de especial interés como son el tratamiento que Newton hizo del arco iris o el Principio de Fermat.
- Servir de recurso para la elaboración de informes históricos a los lectores de la Unidad Didáctica.
- Servir de complemento humanístico-científico a los alumnos de los primeros cursos universitarios.

3.8.2 La secuenciación

A efectos de coherencia en su desarrollo, las dividí en tres capítulos:

Capítulo I (*La mirada del Basilisco*): Es la historia de las teorías extromisiva e intromisiva de la visión que ocuparon toda la antigüedad. Abarca los períodos de su estudio desde sus orígenes hasta

que Kepler desentraña que la retina es el lugar donde se recoge la imagen. En el camino, aparece el insigne Alhazen (mal conocido aún en nuestra cultura), los perspectivistas italianos y los universitarios ingleses. El conocimiento de los pioneros lleva consigo la superación de las posturas incultas que suponen que la ciencia antigua se alimentaba de mitos o de las concepciones ingenuas de los científicos que los suponen desligados de su contexto social e histórico. A pesar del difícil lenguaje que la acompaña, considero un deleite intelectual revisar el poder de sus argumentos, analogías e intuiciones con el mínimo soporte experimental de que disponían.

Capítulo II (*Los paradigmas ópticos de la Revolución Científica*): Cambiado el motivo de la visión por el de naturaleza de la luz, se centra con detenimiento en las obras de Descartes, Newton, Huygens. Constituye una ejemplificación de las controversias entre la teoría de los medios de Huygens y la corpuscular de Newton. Procuré destacar la lenta evolución de los paradigmas, que ambos genios fueron menos dogmáticos en sus tesis que sus seguidores de menos peso, y que con ellos se inicia otra forma de estudiar la ciencia basándola en la experiencia controlada.

Capítulo III (*La Eclosión de la Teoría de los medios*): Desarrolla el fracaso de las tesis de Newton a favor de las ideas ondulatorias que se inició con un soporte experimental mínimo formado por velas, rendijas, cabellos, bastidores de madera y exceso de talento por la sociedad inglesa. El relato del contexto hostil que sufrió Young, los apoyos que recibió Fresnel de su mecenas Arago y la Academia de Ciencias Francesa, son herramientas didácticas para conferir a la ciencia una dimensión más humana. Uno de los apartados en los que me detengo es en el párrafo en que Fresnel desmonta implacablemente el argumento de los “*fits*” de Newton, para mí una de las joyas de la literatura científica.

El capítulo no se detiene como se merece, en la obra de Maxwell porque consideré desproporcionado su estudio en profundidad para este nivel. No obstante el haber encontrado en sus escritos la tesis de que la velocidad de la luz es finita y relacionada con magnitudes electromagnéticas fue la recuperación de un testimonio histórico poco conocido.

Resumiré este apartado diciendo que las lecturas fueron el mayor soporte de los alumnos para el trabajo personal encomendado. Por sus testimonios, las lecturas constituyeron un apoyo ágil, claro y ameno aunque pudieron aprovecharse más. Es mi intención recuperarlas para un ulterior desarrollo.

3.8.3. Las fuentes académicas e históricas

Elegidos como destinatarios de estas lecturas los alumnos del último curso de Bachillerato de Ciencias y los de un primer curso de Historia de la Ciencia en Licenciaturas y Escuelas Técnicas, el techo del nivel académico de las lecturas vendría limitado por los libros de física general y óptica universitarios. Para estos niveles, los clásicos como el Tipler, Sears, Seerway, Hetch, Lansdberg, Shivoukine, Pedrotti, Feynmann, Jenkins, Ditchburn, Casas, Gettys, etc. y otros monográficos cumplían con creces el desarrollo de los conceptos. El motivo de esta tesis me desaconsejó analizar de momento el origen y desarrollo de las ideas cuánticas de la luz.

De otra parte, para la exposición del desarrollo de las ideas históricas, conté con la inapreciable ayuda de los autores originales (Aristóteles, Alhazen, Galileo, Kepler, Huygens, Descartes, Hooke, Boyle, Newton, Euler, Young, Fresnel, Verdet, Faraday y Maxwell), y de un núcleo de historiadores de la ciencia que están divulgando de un modo decisivo su historia: autores como Landsberg, Ronchi, Sabra, Kipnis, Westfall, Blay, etc. están sustituyendo las antiguas historias de científicos por una nueva historia de las ideas científicas iniciada por Ernst Mach en 1886, con lo que ello supone de erudición, selección, análisis crítico y reordenación de los materiales. Fue mi intención seleccionarlas y adaptarlas a los objetivos expuestos.

3.9 El trabajo individual

Tras el desarrollo de la UD, propuse para realizar en las vacaciones de Navidad, una actividad individual suplementaria, a desarrollar en un mínimo de 10 folios, consistente en responder a 19 preguntas (ver anexo V) que :

- controlaran la comprensión de los elementos de epistemología básica más comunes, como el concepto de ley física, teoría, modelo, la relatividad del conocimiento científico, etc.
- demostraran un conocimiento contextualizado en el tiempo de las tesis de Newton y Huygens.
- demostraran el conocimiento cualitativo suficiente de los fenómenos ondulatorios más representativos como difracción, interferencias y polarización.

Estos conocimientos podían extraerse del seguimiento de la Unidad y de una pequeña labor de investigación histórica apoyado en las referidas lecturas del CD y en su propia búsqueda de información por Internet. Sabía del riesgo de falta de originalidad que ello suponía, por lo que adopté algunas medidas para minimizarlo como eran la protección del CD contra copia y escritura, la exigencia de una bibliografía, etc.

A pesar de haber insistido en la sobriedad, originalidad y claridad en la exposición, los trabajos cuyos enunciados se entregaron en las vacaciones de Navidad, fueron de calidad desigual: todos tenían una extensión considerable, pero no sucedió lo mismo con su originalidad y calidad. Algunos tenían exceso de material mal digerido como comprobé en las encuestas posteriores en donde indirectamente se preguntaban tópicos del trabajo. Tres alumnos de nivel de sobresaliente los resolvieron con dignidad.

Para evaluar la asimilación a largo plazo (cinco meses) de los ítems desarrollados, incluí en la encuesta final (en el mes de mayo) entre otras, preguntas relacionadas con ellos. Aunque mejores que los del GCON, sus resultados no fueron muy optimistas como ya he expresado en el Desarrollo.

3.10. Conclusiones finales

Aunque lo reducido de la muestra hace difícil un análisis estadístico en profundidad, podemos extraer algunas consecuencias sólidas respecto de esta experiencia de innovación:

- En los temas relativos a la naturaleza de la luz, la reflexión difusa y la formación de imágenes, encontré errores previos de los alumnos muy persistentes que ya habían comentado otros autores, frente a los que tuve que elaborar estrategias específicas. La acción didáctica desarrollada consiguió una mejor comprensión cualitativa del fenómeno que con la acción tradicional.
- Una abrumadora mayoría de alumnos (tanto de cursos de ESO y Bachillerato), estaba conforme en ser informados de los aspectos históricos y sociales de la ciencia. Sin embargo los de 2º de Bachillerato presentaban quejas si su dosificación era para ellos excesiva.
- La reproducción comentada y discutida de los *Experimentum Crucis* se mostró como una metodología capaz de aunar el interés y la comprensión de las dimensiones teóricas y prácticas de los fenómenos.
- Mis estudiantes incrementaron sensiblemente su motivación por la materia (uno de ellos, de nivel de Bien, decidió elegir los estudios de Ciencias Físicas para este curso y otro dedicó mucho tiempo a la adquisición de juguetes científicos y el manejo de software *demo* de simulación), y su conocimiento cualitativo de los fenómenos y de los contextos históricos de las ideas científicas.
- Los alumnos, de un nivel medio-bajo a excepción de tres, no mejoraron de modo sensible los resultados de las PAU respecto de otros grupos convencionales a pesar de

haber atendido con intensidad suficiente su preparación en esta parcela. De ello se infiere que la principal motivación del docente frente a esta enseñanza alternativa en tanto no cambien las programaciones oficiales, no es tanto una mejora en las calificaciones de sus alumnos, sino una motivación personal basada en el convencimiento de que a largo plazo el mensaje es más duradero, la comprensión del fenómeno es más profunda, y que realiza una labor educativa más integral, al no ser contrastables estos aspectos en las citadas pruebas. No obstante, una vez hecho acopio del material histórico y experimental, considero factible y gratificante la repetición de la experiencia en cursos sucesivos sin grandes esfuerzos suplementarios.

- La evaluación de este trabajo trasciende los resultados de un curso académico, pues quedan los materiales elaborados y el relato de las acciones mejorables que servirán para futuras experiencias educativas.
- Las presentaciones históricas en *Power-Point* resultaron ser unas herramientas novedosas y útiles para los aspectos introductorios de cada capítulo. Con ellas conseguí tanto la familiarización con las figuras de los científicos como enmarcar los paradigmas centrales de cada época. A pesar de su brevedad, es posible expresar con ellas una gran densidad de información.
- La provisión de un CD con una historia resumida de las ideas ópticas, fue un sustituto autosuficiente de la bibliografía requerida para elaborar informes históricos que evita consultas innecesarias en bibliotecas o en la red de Internet.
- Durante el proceso consolidé tanto los conocimientos de epistemología, historia de la física y la óptica y mejoré mi dominio en manejo de software científico y de material experimental de laboratorio e incluso abordé pequeñas investigaciones históricas originales. Considero que esto es un argumento adicional suficiente para recomendar esta experiencia como herramienta de la autoformación de otros profesores.

A la vista del material generado, de la metodología y de los resultados de su aplicación a la didáctica del tema, considero que la investigación expuesta es una propuesta viable, innovadora y útil para la mejora de la didáctica de la óptica en la enseñanza secundaria, y que abre las puertas para el diseño de futuros currículos institucionales más ambiciosos.

BIBLIOGRAFÍA

BLIOGRAFÍA REFERENCIADA

- AAAs Program/Committee :1980,*Science for All Americans*, Oxford University Press, NY.
- AAAs Program/Committee:1980, *150 years of advancing science: A history of AAAs*, Disponible 'on-line': <http://www.archives.aaas.org/exhibit/origins>.
- AAAs Program/Committee:1989, *Science for All Americans: A Project 2061 report*, Washington, DC: AAAS.
- AAAs Program/Comité:1990, *Science for All Americans.Project 2061*,Oxford University Press.
- AAAs Program/Committee :1993, *Benchmarks in Science*, Oxford University Press.
- AAAs Program/Comité: 1993, *Benchmarks for Science Literacy*,Oxford University Press.
- Acevedo J.:1994,'Los futuros profesores de Enseñanza Secundaria ante la sociología y la epistemología de las ciencias. Un enfoque C-T-S.', *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado* **19**, pp.111-125.
- Agustench, M. y otros: 2002, *Física y Química 1º Bachillerato*, Ed. SM
- Aikenhead, G. S. :1985,'Collective decision making in the social context of science, *Science Education* **69** (4), pp. 453-475.
- Aikenhead, G.:2003,'Review of Research on Humanistic Perspectives in Science Curricula', A paper presented at *the European Science Education Research Association (ESERA) Conference*.
- Al Hazen: 1972, *De Aspectibus in Opticae Thesaurus*, Ed.Friedrich Risner in 1572, Reprinted Ed. Johnson New York.
- Al-Haytham , I.: 1989, *The Optics of Ibn Al- Haytham* .Traducción de Sabra A.I., The Walburg Institute University of London .
- Amarjit, S. & Butler, P.: 1990,'Refraction: conceptions and knowledge structure', *International Journal of Science Education* **12** (4) , pp. 429-442
- Andersson, B. & Karrqvist, C.: 1983, 'How Swedish Pupils, Aged 12–15 Years, Understand Light and its Properties',*European Journal of Science Education* **5**(4), pp. 387–402.
- Andersson, B.& Bach F.: 2004, *On Designing and Evaluating Teaching Sequences Taking Geometrical Optics as an Example* , Disponible "on line" :www.interscience.wiley.com.
- Andrés, D. y otros :2000, *Física y Química 1º Bachillerato*. Ed. Editex.
- Andrés, D. y otros :2002, *Física 2º Bachillerato*, Ed. Editex.
- Armero, J. y otros: 1999, *Física 2 º Bachillerato*, Ed. Edebé
- Armstrong, H.E. :1903, *The Teaching of the Scientific Method*, Mc. Millan, London.

- Argyll, D.:1856, 'Presidential Address', *British Association for the Advancement of Science Report*, p. 83
- Agustench, M. y otros:2004, Física y Química 1º Bachillerato, 2004)
- Aristóteles:1970, *Metafísica*, (Edición trilingüe por Valentín García Yebra), Editorial Gredos, Madrid, 3 Vóls.
- Aristóteles : 1995, *Física*, Ed. Gredos. Madrid.
- Aristóteles: 2000, *Acerca del alma* (libro II, capítulo VII), Biblioteca Básica Gredos .
- Aristotle :2000, *De Sensu* (P. M. Morel, Trans.). Paris: Flammarion.
- Arons, A.: 1993, 'Guiding Insight and Inquiry in the Introductory Physics Laboratory', *The Physics Teacher* **31**, pp.278–282.
- Ausubel, D., Novak, J., & Hanesian, H. :1978, *Educational Psychology: A Cognitive View (2nd Ed.)*,New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Baas: 1917, *Report of the British Association American Association for the Advancement of Science*, Murray, London.
- Bacon, F.: 2004, , *Novum Organum: True Directions Concerning the Interpretation of Nature*. Kessinger Publishing , Accesible "on line "en [http:// www.constitution.org/bacon/nov_org.htm](http://www.constitution.org/bacon/nov_org.htm)
- Bartholius, E.: 1991, *Experiments on birrefringent Iceland crystals. (Trad. FacsÍmil, Thomas Archibald)*, Reedición Danish National Librairie of Science and Medicine. Copenhagen, (Original,1669).
- Beauvais, P. : 1980, *Bestiaires du Moyen Age*, (Original 1217), Reedición Paris. Stock.
- Belmonte, I. :1984, *Newton*, Madrid. Editorial Debate.
- Beltran, J.A. :2005, *El oficio, el Coraje y el Placer de enseñar*, Facultad de Educación UCM.
- Benedí A. ,Moreno A.,Galindo,A., Savirón, J. :1996, *Física y Química 1º y 2º Bachillerato*. Mc Graw Hill . Madrid.
- Bennet, A.G.,:1984, *Clinical Visual Optics*, Butterworths.
- Berkeley, G. :1710 , *Treatise concerning the principles of the human knowdeledge*, Aaron Rhames . Dublin
- Berkson, W. :1974, *Fields of force*, Routledge
- Blay, M.:1983, *La Conceptualización Newtonienne des Phénomènes de la couleur*, Librarie Philosphique J.Vrin.
- Blay, M.: 1999, *La Naissance de la Science Classique au XVII^e siècle*, Nathan Université
- Bollack, J. :1965, *Empédocle*, Vol. 1-4 (Paris), Les Editions Minuit.

- Boyer C.:1987, *The Rainbow: from Myth to Mathematics*, Princeton University Press,
- Boyle, R.:1664, *Experiments and considerations touching colours*, Disponible “on-line” en “The Gutenberg Project”.
- Bruner, J.S. :1969, *The Process of Education*, New York : Random House
- Buchwald J.: 1986, *The Rise of the Wave Theory of Light*, University Chicago Press.
- Bruner, J.S. :1960, *The process of education*, New York: Random House.
- Burkman, E.: 1973, The Process of Education, *ISIS newsletter*, **1**.
- Campanario, J.:2003, ‘De la necesidad , virtud: cómo aprovechar los errores y las imprecisiones de los libros de texto para enseñar Física’. *Enseñanza de las Ciencias* **21** (1), pp.161-172.
- Cantor, G.:1970, ‘Thomas Young’s lectures at the Royal Institution’, *Notes and Records of the Royal Society of London* **25** (1), pp.87-112
- Cantor, G.:1981, *Conceptions of Aether*, Cambridge University Press.
- Cantor, G.:1984, *Optics after Newton*, Manchester University Press
- Carrascosa J. y otros,2002, Física y Química 1º Bachillerato. Santillana
- Carreras ,C.& Yuste, M. : 1995, *La luz a través de la Historia*: Cemav (UNED), Madrid.
- Cavell, S. y Brian L.: 1.995, ‘Teaching for conceptual change: Light and Vision’, *Paper for presentation at 25th AARE Conference, Hobart, November*.
- Chalmers, A.:1991, ¿*Qué es esa cosa llamada ciencia?*, Siglo XXI, Madrid.
- Cohen, B.& Whitaker, E. :1971, *Opticks* (prólogo), Dover Publications ,New York.
- Cohen, B. :1975, *Franklin and Newton*, Harvard University Press.
- Cohen, B.:2002, *The Cambridge Companion to Newton*, Cambridge University Press
- Colin, P.: 2002, ‘Reading images in optics: students’ difficulties and teachers’ views’, *Int.J. Sci. Educ.* **24** (3), pp. 313–332.
- Colombo, L.& Pesa, M.: 1999, ‘Obstáculos en el aprendizaje de la polarización luminosa: una experiencia con profesores de física’, *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, **16**(2): pp. 208-225.
- Copérnico N.: 1982, *De Revolutionibus Orbium Caelestium* , Reeditado por Editora Nacional. (Original 1530).
- Conan, J.:1947, ‘On understanding science: an historical approach’, *Isis* **38** (1/2) , pp.125-127.
- Conan, J.:1957, *Harvard Case Histories in Experimental Science*. Cambridge. Harvard University Press.
- Conan, J.:1958, *Education and Liberty: The Role of the Schools in a Modern Democracy*,

Cambridge, Harvard University.

Conan, J.:1945, *General Education in a Free Society: Report of the Harvard Committee*, Harvard University Press, Cambridge, MA.

Confrey, J. :1990, *What constructivism implies for teaching* (p.108), Davis, Maher and Noddings

Consumer Education : 1945,*The Place of Science in the Education of the Consumer*, The Consumer Education Study.

Cromwell, B.:2000, *Optics*, Disponible “ on line” :
<http://www.lightandmatter.com/area1book5.html>

Dedes, C.: 2005 ,‘The Mechanism of Vision: Conceptual Similarities between Historical Models and Children’s Representations’, *Science & Education* **14** , pp.699–712

Descartes, R.:1991, *El Mundo o el Tratado de la Luz*. Reeditado por Alianza Editorial, Madrid.(Original 1633).

Descartes,R. :1996, *Oeuvres de Descartes Vols.I-V, Correspondance*, J. Vrin.

Descartes R.: 1981, *Discurso del Método, Dióptrica, Meteoros y Geometría*, Alfaguara, Madrid . (Original 1637).

Dewey, J. :1902, *The Child and the Curriculum*, University of Chicago Press.

Dewey, J.:1997, *Democracy and Education*, Free Press.

Diderot D. & D’Alembert J.: 2002, *L’Encyclopédie :Sciences* (Original 1779), Ed. Facsímil ,Tours.

Dietrich, F.:1959, *De coloribus : The Scientific Methodology of Theodoric of Freiberg*, Reedición Fribourg University

Driver R. :1985, *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*, Ed. Morata, Madrid

Driver, R.:1986, ‘Students: Thinking and the Learning of Science: A Constructivist View’, *School Science Review* **67**, pp.240- 443

Driver R.:1989, ‘Student's Conceptions and the Learning of Science’, *International Journal of Science Education* **11**, pp.481-490.

Duhem P.:1954, *La théorie physique, son objet et sa structure*, Paris, Editions Rivière (Original 1914).

Einstein, A.: 1970, *Autobiographical Notes*, The Library of Living Philosophers **7**, MJF Books, New York.

Ernst, P.: 1993, ‘Constructivism, the Psychology of Learning, and the Nature of Mathematics: Some Critical Issues’, *Science & Education* **2** ,pp. 87-93.

Euclides:1959, *L’Optique et la Catatoptrique*, Traducido al francés por Ver Eecke P. Blanchard Paris.

- Euler, L. :1843, *Lettres a une princesse D'Allemagne*, Charpentier, Libraire- Éditeur.
- Fawaz A.& Viennot L. : 1985, 'Image Optique et Vision', *Bulletin de l'Union des Physiciennes* **686**, pp. 1125-1145
- Fermat, P. : 1662, *Oeuvres de Fermat(De la Lumière y otras)*, Paris, 1891-1922 **2**, p.354
- Ferraz, A.: 1965 , *Teorías sobre la naturaleza de la luz*, Dossat.
- Feyerabend, P.:2000, *Tratado contra el método*, Tecnos.
- Fokke , T.:2004; 'Römer and the Finite Speed of Light', *Physics Today* **57** (12), pp.16-17.
- Fowler, P.: 2002, 'Why Teach the History of Science in Science?', *Education Forum* **38**. Kate BussGrant House, North Road, Leigh Woods, Bristol.
- Fraassen, B.: 1980, *The Scientific Image*, Oxford: Clarendon Press
- French, A. :1986, 'Setting new directions in physics teaching: PSSC 30 years later' ,*Physics Today*, Sept, 30- 35.
- Fresnel, A. :1819, *Mémoire sur la Diffraction de la Lumière*, Comptes Rendues **5**.
- Fresnel, A.: 1866. *Oeuvres Complètes*, (1815-1827) .Publicado por H. de Senermont, E.Verdet y L. Fresnel
- Friedhental, R.:1995, *Leonardo da Vinci*, Grandes Biografías Salvat, Barcelona.
- Galileo,G.,1994, *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo ptolemaico y copernicano*, Traducido por A. Beltrán, Madrid: Alianza Editorial, p. 101 (Original 1632)
- Galili,I.& Hazan A.: 2000, 'Learners' knowledge in optics: interpretation ,structure and analysis', *Int. J. Sci. Educ.* **22** (1), pp.57- 88 .
- Galili, I. y Amnon, H.:2001, 'The effect of a History-Based Course in Optics on Student's Views about Science', *Science Education* **10** pp.7-32
- Galindo A. y otros: 1996, *Física y Química 1º Bachillerato*, Ed. Mc. Graw-Hill
- Galindo A. y otros :1998, *Física 2º Bachillerato*, Ed. Mc. Graw-Hill
- García T. y otros, 1998, *Física y Química 1º Bachillerato*, Edebé.
- Gil , J.: 2003, *Preconcepciones y errores conceptuales en Óptica. Propuesta y validación de un modelo de enseñanza basado en la Teoría de la Elaboración de Reigeluth y Stein*, Universidad de Extremadura. Servicio de Publicaciones. Disponible "on line": <http://www.pcid.es/public.htm>
- Gil, D.: 2002, 'Defending Constructivism in Science Education', *Science & Education* **11**, pp. 557-571.
- Giordan,A.: 1985, *La Enseñanza de las Ciencias*, Siglo XXI.Madrid.
- Goethe, J.:1982, *Theory of Colours* (Trad. por Charles Lock Eastlake) ,Cambridge, Massachusetts: The M.I.T. Press (Original 1810)

- Grant, E. : 1971, *Basical Science in the Middle Ages*. ,Cambridge History of Scientific Series
- Grimaldi, F. : 1964, *Phisico-mathesis de lumine, coloribus et iride* (Bononiae) . Reimpresión Arnaldo Forni Editore (Original 1665).
- Grosseteste, R.:1912, *De Iride (De Fraccionibus Radiorum)*.Reedición Die Philosophischen Werke des Robert Grosseteste, Bischofs von Lincoln (Münster i. W., Aschendorff,), pp. 72 -78.
- Gohau, G.:1980 , *Difficulties Inherent in a Pedagogy of Discovery in the Teaching of the Sciences*, M. D. Grnek, R. S. Cohen, & G. Cimino (eds.).
- Grnek, M. D. Cohen, R. S. & Cimino, G., *On Scientific Discovery*, 191-210, D. Reidel , Publishing, Company, Dordrecht, Boston, London.
- Guesne, E. (1984) ‘Children’s ideas about light’ , UNESCO :*New trends in Physics Teaching* ,París 4 ,pp.179-192
- Haber- Scaim ,U.:1973,*PSSC: Física (3º ed.)*, Reverté S.A.
- Hall, A.: 1995, *All was light: an introduction to Newton’s Optics*, Oxford University Press.
- Harré, R., 1973, *Grandes científicos*, Labor
- Harvard Committee: 1945 *General Education in a free society*, Harward University Press
- Henderson, E. :1870 , *Life Of James Ferguson F.R.S. In A Brief Autobiographical Account, And Further Extended Memoir (with numerous notes and illustrative engravings)*. Ebenezer publications
- Heering, P.: 2002, ‘An approach in a museum ‘ , *Science and Education* 11 , pp.203-214,
- Hett, W.: 1955, *Aristotle Minor Works:De Coloribus*, Loeb Classical Library, pp. 4-45
- Hind,A.:2001, ‘*Teaching about Science*’. Nuffield Foundation, University of Leeds
- Hirn, C.& Viennot, L.: 2002,Transformation of didactic intentions by teachers: the case of geometrical optics in grade 8 . *Int. J. Sci. Educ.* 24 (3), pp.313–332.
- Hodson, D.:1988,‘Towards a phylosophical more valid science curriculum’, *Science Education*, 72 (1) , pp. 19-40.
- Hodson, D.: 1990, school ‘A critical look at practical work in school science’ *Science Review*, 70 (256),pp. 33-40.
- Hodson D.: 1992, ‘Redefining and reorienting practical work in school science’ *Scholl Science Review* 70 , pp.33-40.
- Hodson, D.: 1992, ‘In search of a meaningful relationship: an exploration of some issues relating to integration in science and science education’, *International Journal of Science Education* 14 (5), pp.541-562.

- Hodson, D.:1993, 'Philosophy stance of secondary school science teachers, curriculum experiences, and children's understanding of science: some preliminary findings', *Interchange* **24** (1-2), pp. 41-52.
- Hodson, D.:1994. 'Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio', *Enseñanza de las Ciencias*, Barcelona **12** (3), pp.299-313.
- Holton, G.:1970, *Harvard Project Physics Course*, New York: Holt.
- Holton, G.:2003, 'The Project Physics Course, Then and Now', *Science & Education* **12**, pp.779-786
- Hooke, R.: 1665, *Micrographia*. London . Disponible "on line" en [http:// Books.google.es](http://Books.google.es)
- Hooke,R. :1672, 'Hooke to Oldenburg', *Philosophical Transaction*' **6** .
- Hooke, R.: 1705, *Posthumous Works of R. Hooke*. Waller, London
- Hosson, C.,2004:*Contribution à l'analyse des interactions entre histoire et didactique des sciences : thèse présentée pour obtenir le grade de docteur*. Université Paris 7 -Denis . Diderot.
- Hosson, C.& Kaminski, W., :2007, 'Historical Controversy as an Educational Tool', *International Journal of Science Education* **29** (5) , pp.617-642.
- Höttecke, D.: 2000., 'How and what can we learn from replicating historical experiments?: a case study', *Science & Education* **9** ,pp.343-362.
- Iparraguirre,L.M.:2007, 'Una propuesta de utilización de la Historia de la Ciencia en la enseñanza de un tema de Física' , *Enseñanza de las Ciencias* **25**(3), pp. 423-434.
- Izquierdo, M. & Aduriz, A.: 2003, 'Epistemological Foundations of School Science', *Science & Education* **12** ,pp.7-43.
- Izquierdo, M.: 1996, 'Relación entre la Historia y la Filosofía de la Ciencia y la Enseñanza de la Ciencia', *Alambique* **8**, pp.53-62
- Izquierdo, M. :2006, 'Relación entre la historia y la filosofía de las ciencias II', *Alambique* **48**
- Jenkins E.: 1989, *Teaching the history of science*, BSHS, 1989
- Jiménez, J.: 2001, Aplicación del análisis secuencial al estudio del texto escrito e ilustraciones de los libros de Física y Química de la ESO, *Enseñanza de las Ciencias*, **19** (1), pp.3-19.
- Kipnis, N.: 1991, *History of the Principle of Interference of light*, Birkhäuser
- Howard, J. :1964, 'The Rayleigh Notebooks', *Appl. Opt.* **3**, p.1129.
- Huygens, C.: 1992, *Traité de la Lumière*, Traducido al francés. Dunod, Paris, (Original 1690).
- Kaminsky ,W. (1989), 'Conceptions des enfants (et des autres) sur la lumière', *Bulletin de l'Union des Physiciens* **716**, pp 973-996.
- Ken'ichi , A.:1993, *The medieval latin tradition of Euclid's Optica*, Kyushu University Press

- Kepler, J.:1611, *Dioptrica* Dadid Francus, Ausburg. Traducido al francés por Peyroux J. Ed. Blanchard ,Paris (Original ,1611)
- Kepler, J.: 2000, *Optics, Ad Witellionen Paralipomena*, Recopilación (Original ,1611), Green Lyon Press.
- Kindi, V.:2005, 'Should Science Teaching Involve the History of Science?, An Assessment of Kuhn's View', *Science & Education* **14** ,pp.721–731.
- Kipnis, N.:1991,History of the Principle of Interference of Light, Bukhäusewr Verlog Basel.
- Kipnis, N.: 1998, '*A History of Science Approach to the Nature of Science: Learning Science by Rediscovering it*' , Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 3–39.
- Kipnis, N.:2005, 'Scientific Analogies and Their Use in Teaching Science', *Science & Education*, **14**, pp. 199–233.
- Kipnis,N.: 2005,'Scientific Discovery: How History and Philosophy can Contribute to Pedagogy', *Science & Education* **14** (1) .
- Kipnis, N.:2007,'Discovery in Science and in Teaching Science', *International History, Philosophy, Sociology & Science Teaching Conference* . University of Leeds
- Klausmeier, H. J. : 1971., *Individually guided education and the multiunit elementary school*. Wisconsin Research and Development Center for Cognitive Learning, University of Wisconsin, Madison.
- Klotz, I M: 1980, 'The N-ray affair', *Scientific American*, May, p.130 .
- Koponen, I.:2006,'Generative Role of Experiments in Physics and in Teaching Physics: A Suggestion for Epistemological Reconstruction', *Science & Education* **15** (3), pp.1–54
- Kragh ,H.: 2006 ,'Social Constructivism: the Gospel of Science' *Science & Education*, **7** (3), pp. 231-243
- Kruckeberg , R. :2006, 'A Deweyan Perspective on Science Education: Constructivism, Experience, and Why We Learn Science', *Science & Education* (2006) **15** , pp.1–30.
- Kuhn, T.: 1970, *The Structure of Scientific Revolutions*,Chicago: Univ. of Chicago Pr.
- Lacourt D.: 2004, Science et Philosophie, La lettre de l'Académie des Sciences **14** pp.10-11 .
- Lakatos, I. & Musgrave,A. : 1970, *Criticism and the growth*, University Press Cambridge
- Leite L.:2002, 'History of Science in Science Education: Development and Validation of a Checklist for Analysing the Historical Content of Science Textbooks' *Science & Education* **11**, pp.333–359.
- Lewis, G.: 1972, *Teaching School Physics* .Ed. UNESCO-Penguin Books, London
- Linberg D.:*The Discours of Light from the Middle Age to the Enlightenment*. Willian Andrews Clark Memorial Library.
- Lindberg, D.: 1976, *Theories of vision from al- Kindi to Kepler*. University of Chicago Press. Chicago

- Lindberg, D., Cantor, G.& Kepros, J.:1986, *The Discourse of Light from the Middle Ages to the Enlightenment*. Willian Andrews Clark Memoria Library.
- Lindberg, D.:1983, *Studies in the History of Medieval Optics*, Variorum Reprints, London
- Lhone J.:1968, 'Experimentum Crucis', *Notes and records of the Royal Society of London* **23**, p.169 ,London .
- Longbrake, E.: 1974, 'Alternatives in science education' ,*The Ohio journal of science* **74** (4).
- Lucrecio :1983, *De la Naturaleza de las Cosas* , Catedra. Letras Universales
- Mach, E. :1926, *The Principles of Physical Optics*. Dover Publications, New York.
- Mach, E.: 1986, *On Instruction the Classics and the Sciences*, Reedición en Popular Scientific Lectures, Open Court Publishing Company, La Sale, IL. (Original 1886).
- Malpas, J. : 2003, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), URL = <<http://plato.stanford.edu/archives/win2003/entries/davidson/>>.
- Marco B., González, A., Amparo Simo, A.:1986, *La perspectiva histórica en el aprendizaje de las ciencias*, I Narcea .
- Mariotte , A. B. :1681, *Essays de Physique ou Mémoires pour Servir à la science des choses naturelles. Quatrième Essay. De la Nature des Couleurs* .A Paris Chez Estienne Michallet
- Márquez R..1996:,'Las experiencias de cátedra como apoyo en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Física',*Revista Española de Física*, **10** (1), pp.36-40.
- Martín J. :1997, Física 2º Bachillerato, Santillana
- Martín M. :2002, Investigación en la enseñanza de las ciencias: porqué y cómo, *Alambique* **34**, pp.30-36
- Matthews M.:1994, A role for history and philosophy in science teaching (p. 60), Routledge .
- Matthews, M.:1994, *Science Teaching*, Routledge. New York, London.
- Matthews, M.:1998, *Constructivism in Science Education*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Matthews, M.:2000, *Time for Science Education: How Teaching the History and Philosophy of Pendulum Motion can Contribute to Science Literacy*, Kluwer Academic, New York..
- Matthews, M.:1997, 'Introductory Comments on Philosophy and Constructivism in Science Education', *Science & Education* **6**, pp.5-14.
- Matthews M.:1992, *History, Philosophy and Science Teaching: The Present Rapprochement*, European Physical Society.
- Matthews, M.:1993, 'Old Wine in New Bottles: A Problem with Constructivist Epistemology'. Alexander (Ed.).

- Matthews, M.: 1994, *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. Routledge.
- Maurines L.: 2002. Le raisonnement des étudiants dans la physique des ondes. *Bulletin de la société française de physique*, décembre 2002-janvier 2003 **137**, p. 30 .
- Maurines L. & Mayrargue A.: 2005 'How the investigations of the students' reasoning on waves and the history of physics can help us to develop research-based innovative units for secondary students on the velocity of light?' *Actes de la huitième conférence internationale sur l'histoire, la philosophie et l'enseignement des sciences (IHPST 8)*, Leeds, p. 67. Disponible 'on line' <http://www.ihpst2005.leeds.ac.uk/>.
- Maurolico, F.: 1611, *Photismi de lumine et umbra*, Neapoli Ex Typographia .
- Maxwell, J.: 1954, *A treatise on electricity and magnetism* (2 vols.). New York, Dover. Reimpresión de la tercera edición del *Treatise*, (Original, 1891).
- Millburn, J.: 1983, 'The London Evening Courses of Benjamin Martin and James Ferguson, Eighteenth Century Lectures on Experimental Philosophy', *Annals of Science*, **40**, pp. 437-55.
- Mihas, P. & Andreadis P.: 2005 'A Historical Approach to the Teaching of the Linear Propagation of Light, Shadows and Pinhole Cameras', *Science & Education* **14**: pp. 675-697, Springer
- Millar, R.: 1989, 'What is Scientific Method and Can it be Taught?', *Skills and Processes in Science Education*, Routledge, London..
- Millar, R., & Osborne, J.: 1998 *Beyond 2000: Science education for the future*. London: King's College, School of Education.
- Mollon, J.: 2003, *The Science of Colour*. Edición Steven K. Shevell . OSA
- Moreno A.: 2000. 'La Historia de la Ciencia: ¿saber útil o curioso complemento?' *Alambique* **24**, pp. 99-112.
- Moreno, A.: 1993, 'Light stories: a brief story of light' *Proceedings of the International Conference on Physics Education: Light and Information*. Universidades do Minho. Braga
- Newton, I.: 1958, *Isaac Newton's papers and letters on natural philosophy*, I.B. Cohen, Cambridge , pp. 47-59
- Newton, I.: 1672, 'New Theory of Light and Colours'. *Phil. Tran.* **6**.
- Newton, I.: 1672, 'Letter from Sir Isaac Newton to Henry Oldenburg'. Publicada en *Philosophical Transactions* **7**, 4032-4034.
- Newton, I.: 1675, *Newton to Oldenburg : An Hypothesis explaining the properties of Light discussed in my several Papers*. Register Book of the Royal Society of London, 65.
- Newton, I.: 1729, *Lectiones Opticae*, Londini.
- Newton, I.: 1971, *Opticks*, 4ª ed. Reeditado por Dover Publications, New York. (Original 1730).

- Newton, I.:1982a: *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*. Editora Nacional. Madrid.. (Original 1696)
- Newton, I.:1982b: *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*.Libro I, Proposición 96, Escholium, Editora Nacional. Madrid. (Original 1696).
- Newton.:1988, *El Sistema del Mundo*, Alianza Editorial
- Newton, I.:1984, *The Optical Papers of Isaac Newton*, Editado por Alan E. Shapiro.Cambridge University Press.
- Newton, I. : 1982c, *Principios Matemáticos de la Filosofía Natural*.Libro Libro I.,Parte II. Prop.IX, Editora Nacional. Madrid. (Original 1696).
- Nickles, T. (1980). Introductory essay: Scientific discovery and the future of philosophy of science. In T. Nickles(Ed.), *Scientific discovery, logic, and rationality* (pp. 1–59). Dordrecht: Reidel.
- Novack, J.: 1985, *Teoría y práctica de la educación*, Alianza Universidad.
- Novack, J.:1988, *Aprendiendo a Aprender*, Martínez Roca, 1988
- Nunn, T.: 1920, *Education: its data and first principles*, New York : Longmans, Green and co.; London, E. Arnold. Digitalizado por MSN, 2007.
- Osborne, J.: 1996, Beyond constructivism, *Science & Education* **80** (1), pp.53-82.
- Osuna, L.y Martínez J.: 2001, ‘La elaboración de una unidad didáctica sobre La Luz y la Visión: análisis de las barreras históricas y su relevancia en la enseñanza’ ,*Actes V Jornades de la Curie, 2001*
- Osuna , L.:2007, ‘Planificando la enseñanza problematizada: el ejemplo de la Óptica Geométrica en la Enseñanza Secundaria’, *EECC*, 2007 **25** (2), pp.277-294.
- Park D. :1997, *The Fire Within the Eye: A Historical Essay on the Nature and Meaning of Light*. Princeton University Press.
- Peckan, J. 1970.: *Perspectiva communis* . Reeditado por Madison, University of Wisconsin Press. (Original 1290).
- Perales F. & Jiménez, J.:1997, Propuesta taxonómica para un análisis de las ilustraciones en los textos de física y química .*Avances en la didáctica de las Ciencias Experimentales* , pp.519-528.
- Perales, F.: 2002, ‘Las ilustraciones en la enseñanza-aprendizaje de las ciencias. Análisis de libros de texto’ .*Enseñanza de las Ciencias* **20** (3), pp.369-386.
- Perales, F.:2006, Uso (y abuso) de la imagen en la enseñanza de las ciencias, *Enseñanza de las ciencias* .**24**, (1), pp.13-30
- Perales,F.: 2006, ‘Pasado, presente y ¿futuro? de los libros de texto’, *Alambique*, pp.57-63.

- Pesa, M., Colombo, L. & Bravo, S.: 1995, 'Formas de razonamientos asociadas a los sistemas preconceptuales sobre naturaleza y propagación de la luz: resultados de una experiencia piloto', *Cad. Cat. Ens. Fis.* **12** (1), pp.17-31.
- Phillips, D.: 1995, 'The good, the bad and the ugly: the many faces of constructivism', *Educational Researcher* **24** (7), pp.5-12.
- Phillips, D.: 1997, 'Coming to Terms with Radical Social Constructivisms', *Science & Education*, **6**(1-2), pp.85-104.
- Piaget 1970, *La teoría de Piaget*. Monografías de Infancia y Aprendizaje, 2.
- Pintó R. & Ametller J.: 2002, Students' difficulties in reading images. Comparing results from four national research groups. *Int. J. Sci. Educ.* **24**, (3), pp 333–341.
- Platón: 1997, *El Timeo*. Biblioteca Clásica Gredos.
- Popper, K.: 1959, *The Logic of Scientific Discovery*, London. Basic Books, New York, p. 107.
- Popper, K.: 1983, *Conjeturas y refutaciones al desarrollo del pensamiento científico*, Paidós. Buenos Aires
- Porta G.: 1558, Natural Magic, Disponible 'on line' en <http://homepages.tscnet.com/omard1/jportab1.html>
- Porta G. : 1589, *De Refractione Optices*, Iacobum Carlinum & Antonium Paces.
- Puente J. y otros.: 2001, Física 2º Bachillerato. Ed. SM
- Ptolomeo, C.: 1989, *L'Optique de Claude Ptolomée*, Traducción de Albert Lejeune. Leiden, Brill.
- Raftopoulos, A.: 2005, 'The Study of Newton's Work and the Teaching of Optics', *Science & Education* **14**, pp.649–673.
- Rashed, R. : 1990, 'A. Pioneer in Anaclastics: Ibn Sahl on Burning Mirrors and Lenses', *ISIS* **81**, pp.464-491.
- Redish, E: 1999, 'Millikan Lecture: Building a Science of Teaching Physics', *American Journal of Physics* **67**, pp.562–573.
- Ronchi V. : 1956, *Histoire de la Lumière*, Librairie Armand Colin.
- Röemer, M. : 1676, 'Démonstration touchant le mouvement de la lumière', *Journal des Savants* du lundi 7 décembre 1676, pp.276-279.
- Romdhane I. y Maurines L. : 2003, 'Students and the interference of light : first results', *Proceedings of the fourth international conference of ESERA*, Noordwijkerhout, <http://www1.phys.uu.nl/esera2003/programme/pdf/192S.pdf>
- Sabra, A.: 1967, *Theories of light from Descartes to Newton*. London.
- Sabra, A.: 1989, *The Optics of Ibn Al Haythan*, London the Warburg Institute.

- Salinas, J.: 2000, 'Enseñanza Experimental de la Óptica Geométrica: Campos de Visión de Lentes y Espejos', *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22** (2).
- Sanchez, C.:2001, 'Experimentos de Óptica con un puntero Laser', *Alambique* **28** , pp. 113-119.
- Sarton, G ., : 1950, *Introduction to the history of science*, Baltimore, Md.: Carnegie Institution of Washington
- Satoca y otros, 1997, Física y Química 1º Bachillerato. Anaya
- Satoca J. y otros:1998, Física 2º Bachillerato. Anaya
- Selles M.& Solís C.:1991, *La Revolución Científica*, Madrid. Ed. Síntesis.
- Sepper, D.:1988, *Goethe contra Newton*, Cambridge University Press.
- Shamos ,H.:1987.*Great Experiments in Physics*, Dover.
- Shortland M.:1989, *Teaching the History of Science*. BSHC. Basil Blackwell, Oxford.
- Smith, C. & Wise, M.N.:1989, *Energy and Empire: A Biographical Study of Lord Kelvin*, Cambridge University Press..
- Soler, V. :2002, El problema de la imagen en la enseñanza de la Física, *Alambique* **32**, pp.92-100.
- Sotres F. y Moreno A.:2007, Los Experimentum Crucis de Óptica Física en las EEMM. *Revista Española de Física* **21** (3), pp.53-59.
- Steering C.:1957, 'Improving the Quality and Effectiveness of Introductory Physics Courses', *American Journal of Physics* **25** (7), pp.417-424 .
- Sumisa, J.:1986, *Gassendi the atomist*, Cambridge University Press
- Taton, J.:1956, *Histoire de la lumière*, Paris Armand Colon .
- Taton, R.: 1971, *Historia general de las ciencias*, Destino.
- Thompsen, P.: 1998, 'The Historical-Philosophical Dimension in Physics Teaching: Danish Experiences', *Science & Education* **7**, pp.493-503, Kluwer Academic Publishers.
- Trumper, R.:2003, 'The Physics Laboratory – A Historical Overview and Future Perspectives', *Science & Education* **12**, pp.645–670.
- Varela P. : 1989, *Iniciación a la Física en el Marco de la Teoría Constructivista*. MEC.
- Vigneul-Marville, B.:1725, *Mélanges d'Histoire et de Littérature* :Paris Claude Prudhomm..
- Vilarasau, J.: 1981, *Museu de la Ciencia*. Barcelona. CEGE.
- Vygotsky, L.:1986, *Thought and language*, Cambridge, MA: The MIT Press.
- Wade, N.: 2000, *A Natural history of Vision*, Bradford Books. Cambridge Massachussetts

- Watson, F.: 1953 , 'The Place of the Experiment in Science Education', *NASSP Bulletin*, **37**, (191), pp. 96-100. Watts, D.M. (1985), Students' conceptions of light: a case study. *Physics Education* **20**, pp.183-187.
- Watson, J., Prieto, T. & Dillon, J.: 1995, 'The Effects of Practical Work on Students' Understanding of Combustion', *Journal of Research in Science Teaching* **32**, pp.487-502.
- Weiss R. :1996, *A brief history of light and those that lit the way* .World Scientific Publishing Company.
- Westfal, R.:1962, 'The developments of Newton's Theory of color', *Isis* **53** (3).
- Worrall, J.: 1976 , *Thomas Young and the 'refutation' of Newtonian optics: a case-study in the interaction of philosophy of science and the history of science*, pp.107-179. Cambridge University Press.
- Verdet, E. : 1869, *Leçons d'Optique Physique*, Victor Masson et Fils Éditeurs (Dos volúmenes)
- Vernet G.:1975, *Historia de la Ciencia Española*. Madrid. Editorial Altafulla.
- Versoris J.: 1491, *Questiones ... super libros ethicorum Aristotelis*, Impresse per Henricum Quentel Civem alme Civitatis coloniensis
- Whittaker, E.: 1962, History of the theories of Aether and Electricity **1** , pp.16-29
- Witello :1270, *Perspectiva*, Ed. Risner.
- Wheatley, G.:1991, 'Constructivist Perspectives on Science and Mathematics Learning' *Science Education* **75** (1).
- Wittmann, M.:1998, *Making sense of how students come to an understanding of physics: An example from mechanical waves* (Tesis Doctoral) . Disponible 'on line' en <http://www2.physics.umd.edu/~wittmann/research/>
- Young, T. 1800 Outlines of experiments and inquiries respecting sound and light. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* Vol. **90**, pp.106-150.
- Young, T. : 1801 : 'Outlines of Experiments and inquiries respecting sound and light: A Bakerian Lecture' , *Philosophical Transactions*
- Young, T.: 1801, The Bakerian Lecture: On the Mechanism of the Eye, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. **91**, pp. 23-88.
- Young, T.:1802a, 'On the theory of light and colours ,a Bakerian lecture', *Philosophical Transactions of the Royal Societ* **92**, pp.12-48. Disponibilidad de acceso libre en <http://gallica.bnf.fr>.
- Young, T.:1802b, 'An account of some cases of the production of colours not hitherto described', *Philosophical Transactions of the Royal Society* Vol. **92**, pp.387-397. Disponible en la Biblioteca de la Real Sociedad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Madrid.

Young, T.:1804, 'Experiments & and Calculations relative to physical Optics: a Bakerian Lecture'. *Philosophical Transactions* Vol. **94** , pp.1-16

Young, T.:1817, *Chromatics*. Suplemento de la Encyclopaedia Britannica **3**, pp.141–163.

Ziman,J.:1980, *Teaching and Learning about Science and Society*, pp.118-123 Cambridge University Press, Cambridge.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Aanequin R.: 1976, *Óptica* , Reverté.

Alonso M.: 1976, *Física* (Vol. II),Fondo Educativo Interamericano

Bennet A.G.:1984, *Clinical Visual Optics*, Butterworths

Born & Wolf : 1982,*Principles of Opticks* , Cambridge University Press .Sixth Edition

Cabrera, J.: 1943, *Introducción a la Física Teórica*, Publicaciones de la Universidad de Zaragoza

Carreras ,C. Y Yuste, M.:1992, *Fundamentos de la radiación Laser*, Cuadernos de la UNED

Carlson, N.: 1994, *Procedimientos Clínicos en el Análisis Visual*, Colegio Nacional de Ópticos Optometristas.

Casas, J.: 1994, *Óptica* , Librería General Zaragoza.

Cassidy, D., Holton, G. & Rutherford, J.: 2002, *Understanding Physics*, Springer Verlag.

Crone R.:1999, *A History of color*, Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

Dedes, C.: 2005 ,‘The Mechanism of Vision: Conceptual Similarities between Historical Models and Children’s Representations’, *Science & Education* **14** , pp.699–712

Ditchburn ,R.:1991,*Ligth* , Dover

Douglas, J.:1994, *Physics for Oftalmologists*, Churchil Livingstone

Elmore W.: 1985, *Physics of Waves*, Dover, 1985.

Falk ,D.:1989, *Seen the light*, Hasper & Row Publishers.

Faucher R.:1957, *Physique*, Librairie A. Haitier.

Fowles, G.: 1989, *Introduction to Modern Optics*, Dover

Feymann, R.:1960, *Lectures on Physics* (*Chapter I*), Adisson Wesley.

Feymann, R. : 1988, *QUED: The Strange Theory of Light and Matter*. Princeton University Press

Françon M. 1970, *Experiments in Physical Optics*, Gordon and Breach Science Publishers.

Françon M.:1972, *Holografía*, Paraninfo.

Gettys W.: 1991, *Física*, Mc Graw Hill

Gordon, M.: 1988, *Laser Cookbook*, Taab Books Inc.

Halliday, D, & Resnik, R :2001, *Physics*, 6th extended edition, John Wiley & Son.

Harvey, P.: 1962, *Optics, experiments and demonstrations*, John Hopkins Press

Hetch , 1974, *Optics* (2end edition), Adisson-Wesley.

Holton, G.: 1952, *Introducción a los conceptos y teorías de las Ciencias Físicas*.Reverté

Holton, G.: 1972,*Fundamentos de la Física Moderna*, Reverté. Barcelona

Holton, G.&Brush, S.:1985, *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*, Princeton University Press, Princeton, NJ.

Jenkins F.:1981, *Fundamentals of Optics*(IV Edición), Mc Graw-Hill. Auckland.

Johnson, B.: 1960,*Optics and Optical Instruments*, Dover

Kipnis, N.:1992, *Rediscovering Optics*, Bena Press, Minneapolis.

Lemoine, J.:1946, *Optique*, Librairie Vuivert. Paris.

Landsberg G. : 1984, *Optica I*, MIR

Landsberg G. : 1984, *Optica II*, MIR

Landsberg ,G.: 1989, *Elementary TextBook on Physics (Vol 3)*. Mir Publishers Moscow.

Legrand, Y. :1972, *Optique Physiologique* (tome **II**, deuxième édition) ,Masson et C^{ie}. Éditeurs.

Legrand, Y.: 1991, *Optica Fisiológica* (tomo **I**),Sociedad española de Optometría.

Longhurst, R.: 1973, *Geometrical and Physical Optics* ,Longman, London

Lynch, D.:2001, *Color and Light in Nature*, Cambridge University Press (2^a Ed.)

Marcén, J: 1998, *Instrumentos Ópticos*, Escuela Universitaria de Óptica.

Minnaert, M.:1954, *Light & Colour in the open air*, Dover

Mollon, J. :2003, *The Science of Colour*. Edición Steven K. Shevell . OSA

Naval Education:1989, *Basic Optics and Optical Instruments*, Dover Publicatios, INC. Mineola

Nourse, A.: 1969, *Universe, Earth, and atom; the story of physics*, Harper & Row, New York .

Pedrotti, F.: 1996, *Introduction to Optics*, Prentice Hall London.

- Prat, R.: 1986, *La Óptica*, Ediciones Orbis S.A.
- Ronchi V. 1991, *The Science of Vision*, Dover Publications.
- Rossotti, H.:1983, *Colour: Why the World Isn't Grey*, 105.Princeton U. Press.
- Sanjurjo R.: 1897, *Física Experimental*, Librería de Hernando y Compañía. Madrid.
- Sears ,W.: 1966, *Física* (3ª ed.),Aguilar.
- Seerway, R. 1995 : *Physics for Scientists & Engineers*, Harcourt Brace College Publishers.
- Sivoukhine, D.:1984, *Optique I*,MIR.
- Sivoukhine, D.:1984, *Optique II*, MIR.
- Slater, J.: 1969, *Electromagnetism*, Dover.
- Tipler, P.:1997, *Física* (3ª ed.), Reverté S.A.
- Van- RiemsdijkJ.:1981,*The Science Museun*, Norwich. Jarrid Colour Publications
- Vilarasau, J.: 1981, *Museu de la Ciencia*.Barcelona. CEGE.
- Willianson S.:1983, *Light and Colour*, John Willey and Sons. New Cork
- Wulf, T.: 1929, *Tratado de Fisica*, Tipografía Católica Casals. Barcelona.
- Whestphal , W.: 1951,*Tratado de Física*, Editorial Labor S.A. Barcelona 1951.

ANEXO I

LOS CUESTIONARIOS INICIALES PARA ALUMNOS

CUESTIONARIO INICIAL DE OPTICA PARA ALUMNOS

Este cuestionario pretende conocer las ideas previas que tienen los alumnos/as de los centros de la provincia de Madrid sobre temas relacionados con la Óptica y su enseñanza, para su uso en una investigación didáctica. Procura ser conciso y claro en las respuestas aunque no estés seguro de si son correctas. No consultes ningún libro ni a ningún compañero, pues entonces estarías expresando ideas ajenas y ni tu trabajo ni el nuestro tendrían sentido. Madura las respuestas y exprésate de modo espontáneo con tu propio lenguaje. Gracias por tu colaboración.

EDAD.....CURSO.....IES :GREGORIO MARAÑON+ ALKAL'A NAHAR.



PERCEPCION SOCIAL DE LA CIENCIA

1.- La investigación científica no militar (responde a una sola opción):

Contribuyen a la creación de medios innecesarios ☐ Incide en la degeneración del medio ambiente ☐ Hace una labor social importante ☐

2.-¿Crees en los horóscopos? ¿Por qué?

3.- Pon ejemplos de descubrimientos importantes en este siglo

4.-Hasta el siglo pasado, la ciencia era un patrimonio exclusivo del mundo occidental ¿eran nuestros abuelos más inteligentes que las demás razas? ¿había otras razones?

5.- ¿Sería posible que un genio como Newton hubiera progresado de no haber asistido a la Universidad? Quizás ☐ En absoluto ☐

EPISTEMOLOGIA E HISTORIA DE LA CIENCIA

6.-¿Puedes citar dos ejemplos de teorías científicas definitivamente ciertas?

7.- Algunos piensan que la ciencia nunca será capaz de conocer los secretos de la Naturaleza y que basta con proponer teorías que predigan correctamente sucesos futuros sin profundizar en los últimos motivos¿estás de acuerdo? ¿es importante para el progreso de la ciencia?

8.- ¿Qué es un modelo científico?

9.-¿Qué diferencia una opinión personal de un informe científico?

10.-Relaciona las letras de la columna central con los números de las columnas izquierda y derecha (puede haber varios números para una misma letra, y pueden coincidir los números asignados a las distintas letras).(Ejemplos: a1,a2,a7 b2,b5....)

Científico	Relaciones
a) Newton	
c) Galileo	
d) Kepler	
e) Descartes	
f) Maxwell	
g) Young	
h) Huygens	
i) Bohr	
j) Hooke	
k) Halley	
l) Copérnico	
m) Einstein	
n) M. Curie	

1.visión
2.muelles
3.astronomía
4.fuerzas
5.longitud de onda
6.electrones
7.cuantos de luz
8.ondas de radio
9.electromagnetismo
10.reloj de péndulo
11.órbitas elípticas
12.telescopio

13.espectros
14.prismas
15.polarización
16.microscopio
17.arco-iris
18.gravedad
19.plano inclinado
20.colores
21.interferencia
22.difracción
23.fotones
24.- Radiactividad

11.- pocos científicos actuales conocen historia de la ciencia ¿el conocimiento de las historias de los científicos, puede servirnos de algo? cultura histórica ☐ conocer mejor el proceso científico ☐

12.-¿Qué es el éter de los antiguos? (por ejemplo se dice de algo que es *etéreo*, una película reciente se titula *El Quinto Elemento* o Calderón de la Barca en *La Vida es Sueño* habla de las *etéreas salas*...)

13.-Te interesa conocer historias de los avances científicos históricos y de sus protagonistas? Sí ☐ no ☐

NATURALEZA E INTERACCION DE LA LUZ CON LA MATERIA: COLORES, REFLEXION, DIFUSIÓN Y REFRACCION

14.-¿Cuándo abres los ojos en una habitación a oscuras, no detectas los colores de los objetos pero si enciendes una luz lo haces sin dificultad. ¿Ves alguna relación entre ambos fenómenos? (elige sólo una respuesta).

- Porque el aire se vuelve luminoso y podemos ver los colores de los objetos ☐
- Porque los cuerpos radian sus propios colores ☐

Porque la luz choca con los objetos y éstos reemiten sólo algunos colores ☐

15.- En un día nublado ¿tenemos sombra? ¿ cómo lo explicas?

16.- Si observamos una hoja de papel blanco y un espejo sobre el suelo de una habitación oscura ¿qué objeto destaca más? ¿Por qué?

17.- el gato Garfield y su dueño Findus se encuentran en una habitación con respectivas tazas de café, cuando se corta la luz y quedan totalmente a oscuras. Elije las respuestas correctas.

Garfield

- a) no verá su taza en absoluto ☐
- b) la verá con dificultad. ☐
- c) la verá sin ningún problema. ☐

Findus

- a) no verá su taza en absoluto ☐



- b) la verá con dificultad. ☐
c) la verá sin ningún problema. ☐

18.- Carolina mira un pequeño pino en el jardín . Es mediodía. El sol brilla y es fácil ver el árbol. Carolina piensa:

de noche es imposible ver el árbol. Durante el día es fácil verlo. Está claro que depende de si el sol está o no. Son embargo hay una distancia entre el árbol y yo, y ambos estamos muy lejos del sol ¿ Cómo me ayuda en realidad el sol a ver el pino?

¿Cómo contestarías las dudas de Carolina? Ayúdate de algún dibujo para completar tu respuesta.



19.-Si se apunta un puntero de laser verde sobre un cielo estrellado, se ve un haz que parece llegar a las estrellas , pero si se sustituye por un haz rojo no se observa la trayectoria ¿cómo lo puedes explicar?

NATURALEZA E INTERACCIONES DE LA LUZ II

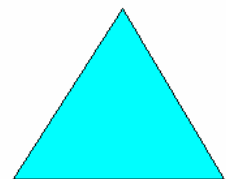
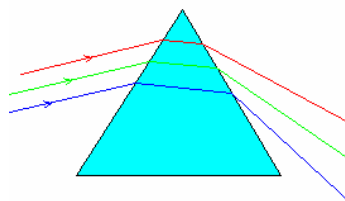
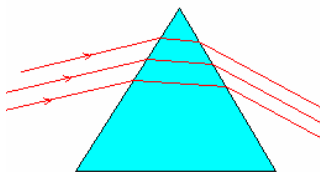
20.-El cuello de las palomas , a veces se ve de color verde y a veces morado ¿de qué color es en realidad?

21.-Los puntos de la pantalla de TV tienen los tres colores, rojo, verde y azul (RGB), ¿sabes por qué?

22.-La luz del sol ¿cuántos colores tiene? ¿cuáles?

23.-En las fotos de la superficie lunar, el cielo se ve negro ¿ cómo lo explicas?

24.-Tres rayos de luz roja incidentes sobre un prisma se desvían según el dibujo adjunto. Tres rayos rojo, verde y amarillo como se indica también ¿Cómo lo haría un único rayo de luz blanca?



25.-En algunas ocasiones se pueden ver en el cielo trozos de arco-iris incompleto. ¿Puedes suponer alguna razón que lo explique?

ONDAS DE LUZ Y MATERIA

26.- Si se extrae todo aire de una campana no se oye el sonido de un despertador ¿ se vería la luz de una pequeña linterna encendida?

SI ☐ NO ☐

¿Por qué?

27.-De los siguientes fenómenos, algunos tienen comportamiento de onda y otros no. Destaca con una cruz los que lo sean y justifícalo brevemente en cada caso.

Tsunami ☐

Sonido ☐

Piedra que cae ☐

Luz ☐

28.- Cuando un instrumento emite una nota musical ¿llegan las partículas de aire inicialmente perturbado hasta nuestro oído?

SI ☐

NO ☐

NO SÉ ☐

29.-¿Cómo explicas que oigamos el sonido de un foco sonoro que está situado detrás de una tapia muy gruesa?

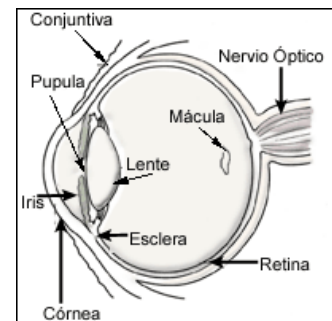
30.-Cuando miras de noche a un foco lejano , al cerrar levemente los ojos se observa que aparecen rayas largas luminosas ¿ Cómo lo explicas?

31.- Si miras al sol de frente con los ojos entreabiertos, se ven destellos de varios colores.¿De dónde proceden?

32.-¿Te parecería una broma si alguien te dijera que luz más luz puede dar oscuridad?

VISION

33.-Cuando inicias la observación de un objeto pequeño situado en el suelo ,debes fijarte en él un rato hasta que lo percibes con nitidez. ¿Puedes explicar por qué? puedes ayudar de un esquema ocular)



34.-¿Qué influencia tiene el cristalino (o lente) en la observación de un objeto? ¿ y la retina?

35.-¿Por qué razón las personas de edad madura estiran el brazo para leer?

CUESTIONARIO INICIAL DE ÓPTICA PARA ALUMNOS

Este cuestionario pretende conocer las ideas previas que tienen los alumnos/as de los centros de la provincia de Madrid sobre temas relacionados con la Óptica, para su uso en una investigación didáctica que pretende mejorar su enseñanza. Procura razonar las respuestas aunque no estés seguro de si son correctas. No consultes ningún libro ni a ningún compañero, pues entonces estarías expresando ideas ajenas y ni tu trabajo ni el nuestro tendrían sentido. Madura las respuestas y exprésate de modo espontáneo con tu propio lenguaje. Gracias por tu colaboración.

EDAD.....17.....CURSO: FÍSICA .2º BCN.....IES: SAN JUAN BAUTISTA



PERCEPCION Y COMPRENSIÓN SOCIAL DE LA CIENCIA

1.- La investigación científica no milita (responde a una sola opción):

Contribuye a la creación de medios innecesarios ☐ Incide en la degeneración del medio ambiente ☐ Hace una labor social importante ☐

2.- Pon ejemplos de descubrimientos importantes en este siglo.

4. Si tienes una idea científica que supones original ¿Conseguirías publicarla en una revista científica? ¿De qué depende que te la admitan?

4.-Hasta el siglo pasado, la ciencia era un patrimonio exclusivo del mundo occidental ¿eran nuestros abuelos más inteligentes que las demás razas? ¿había otras razones?

5.- ¿Sería posible que un genio como Newton hubiera progresado de no haber asistido a la Universidad? Quizás ☐ En absoluto ☐
Razónalo

6. ¿Tiene sentido que España siga investigando si nuestra situación económica permite comprar cualquier adelanto a países como USA? Sí ☐ NO ☐

EPISTEMOLOGIA E HISTORIA DE LA CIENCIA

7.¿Qué es una hipótesis científica?

8.¿Qué es una teoría científica?

9.¿Puedes citar dos ejemplos de teorías científicas definitivamente ciertas?¿Y provisionales?

10.Algunos piensan que la ciencia nunca será capaz de conocer los secretos de la Naturaleza y que basta con proponer teorías que predigan correctamente sucesos futuros sin profundizar en los últimos motivos ¿estás de acuerdo? ¿es importante para el progreso de la ciencia?

11.- ¿Qué es un modelo científico?

12. ¿Qué diferencia una opinión personal de un informe científico?

HISTORIA DE LA CIENCIA: MOTIVACIÓN Y CONOCIMIENTOS

13.-Relaciona las letras de la columna central con los números de las columnas izquierda y derecha (puede haber varios números para una misma letra, y pueden coincidir los números asignados a las distintas letras).(Ejemplos: a1,a2,a7 b2,b5....)

Científico	Relaciones
a) Newton	
c) Galileo	
d) Kepler	
e) Descartes	
f) Maxwell	
g) Young	
h) Huygens	
i) Bohr	
j) Hooke	
k) Halley	
l) Copérnico	
m) Einstein	
n) M. Curie	

1.visión
2.muelles
3.astronomía
4.fuerzas
5.longitud de onda
6.electrones
7.cuantos de luz
8.ondas de radio
9.electromagnetismo
10.reloj de péndulo
11.órbitas elípticas
12.telescopio

13.espectros
14.prismas
15.polarización
16.microscopio
17.arco-iris
18.gravedad
19.plano inclinado
20.colores
21.interferencia
22.difracción
23.fotones
24.- Radiactividad

14.-¿Qué es el éter de los antiguos? (por ejemplo se dice de algo que es *etéreo*, una película reciente se titula *El Quinto Elemento* o Calderón de la Barca en *La Vida es Sueño* habla de las *etéreas salas*....)

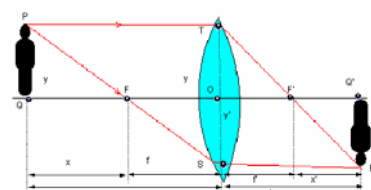
15.-Te interesa conocer historias de los avances científicos históricos y de sus protagonistas? Sí ☐ no, es una pérdida tiempo poco práctica ☐

¿Por qué?

IMÁGENES REALES EN PANTALLA Y EN VISIÓN

16.- La foto de la figura muestra la imagen de una vela alejada de una lente convergente (real, de menor tamaño e invertida) que forma ésta sobre una pantalla. Si retiramos la pantalla y pusiéramos el ojo en la posición de esa pantalla y mirásemos a través de la lente hacia la vela ¿qué veríamos?.

- La imagen de la vela completa invertida con el mismo tamaño ☐
- La imagen de la vela completa directa con el mismo tamaño. ☐
- La imagen de la vela invertida con el mismo tamaño. ☐
- No veríamos ninguna imagen. ☐
- Veríamos un trozo de la imagen ☐
- No veríamos nada porque al quitar la pantalla desaparece la imagen ☐



17.- Si colocamos el ojo delante o detrás de la posición anterior ¿Veremos imagen? Razona.

18.- El diagrama anexo muestra la imagen real que recoge una pantalla de un objeto cuando se coloca una lente entre ambos.

Si desaparece la pantalla ¿ hay imagen?

Sí ☐

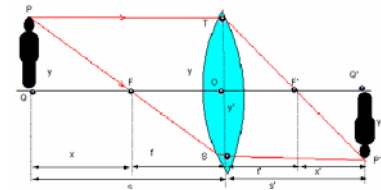
NO ☐

Razona por qué

¿Y si desaparece la lente, hay imagen?

Sí ☐ no ☐

¿Qué vemos si colocamos el ojo en la posición de la imagen real y quitamos la pantalla? Explícalo



Si estás de acuerdo, completa la explicación¿Tienes otras explicaciones? Razónalo con un dibujo propio

NATURALEZA E INTERACCION DE LA LUZ CON LA MATERIA: COLORES, REFLEXION, DIFUSIÓN Y REFRACCION

19.- Si el sol se apagase de repente,

- La Tierra se quedaría a oscuras de inmediato porque si no hay foco de luz no hay luz. ☐
- Tardaríamos unos minutos en darnos cuenta porque la luz es independiente del foco una vez que se ha emitido ☐
- después de apagarse el foco, la luz residual continúa su viaje por el espacio o se absorbe en los objetos con los que choca. Por ello tar daríamos un rato en percibir el apagón ☐.

Aclara tu respuesta:

20.-Si en una habitación cerrada se funde la bombilla :

- La luz ambiental desaparece porque estaba ligada a la bombilla. ☐
- La bombilla emite luz constantemente y al desaparecer la fuente, los materiales de la habitación absorben de inmediato la luz residual. ☐
- Aunque el filamento se oscureciera de inmediato, la luz dura unos brevísimos instantes tras apagarse la bombilla ☐

21.-¿En qué consiste el mal de ojo? ¿ Crees en él?

22.- Aristóteles decía que aunque la luz se supone viajar en línea recta, al amanecer se hace una claridad por todas partes porque la luz solar convierte el aire que durante la noche era opaco en transparente. ¿Estás de acuerdo con él? Discútelo.

23.-¿Cómo explicas que la imagen de algo tan grande como una montaña quepa en un instrumento tan pequeño como es el ojo humano?

24.-¿Cómo explicas que los gatos vean de noche? ¿Por qué brillan sus ojos en la oscuridad?

25. ¿Cuándo abres los ojos en una habitación a oscuras, no detectas los colores de los objetos pero si enciendes una luz lo haces sin dificultad. ¿Ves alguna relación entre ambos fenómenos? Explícalo

26.- En un día nublado ¿tenemos sombra? ¿ cómo lo explicas?

27.- Si observamos una hoja de papel blanco y un espejo sobre el suelo de una habitación oscura ¿qué objeto destaca más? ¿Por qué?

28.- el gato Garfield y su dueño Findus se encuentran en una habitación con respectivas tazas de café, cuando se corta la luz y quedan totalmente a oscuras. Elije las respuestas correctas.

Garfield

a) no verá su taza en absoluto ☐

b) la verá con dificultad. ☐

c) la verá sin ningún problema. ☐

Explica por qué

Findus

a) no verá su taza en absoluto ☐

b) la verá con dificultad. ☐

c) la verá sin ningún problema. ☐

Explica por qué:



29.- Carolina mira un pequeño pino en el jardín . Es mediodía. El sol brilla y es fácil ver el árbol. Carolina piensa:

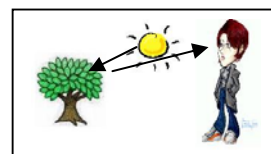
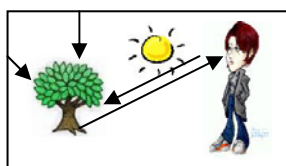
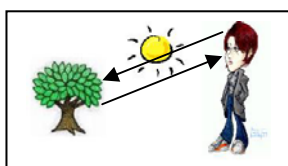
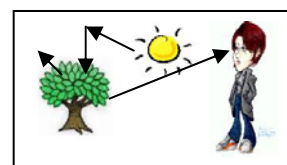
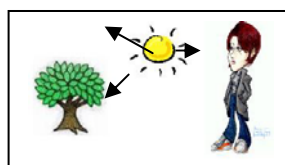
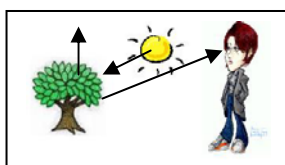
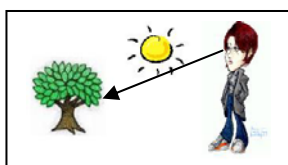
de noche es imposible ver el árbol. Durante el día es fácil verlo. Está claro que depende de si el sol está o no. Son embargo hay una distancia entre el árbol y yo, y ambos estamos muy lejos del sol ¿ Cómo me ayuda en realidad el sol a ver el pino?

¿Cómo contestarías las dudas de Carolina? Rodea con un círculo un dibujo de entre los que se adjuntan que más se acerque a tu explicación.

Posible explicación:

“El sol llega a Carolina e induce en ella la facultad de emitir rayos visuales durante el día que al encontrar el pino rebotan en él y le devuelven la información de su color y tamaño.
Por la noche pierde esa facultad y por eso no ve”

Escribe aquí tu explicación



Si en la situación anterior se nublase el día ¿cuál serían las nuevas flechas y la nueva explicación?



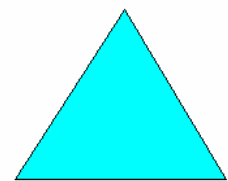
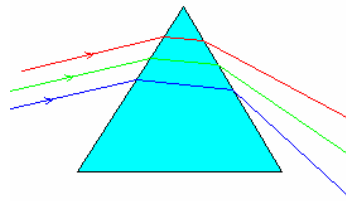
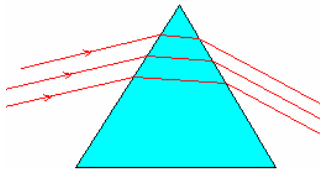
30.-Si se apunta un puntero de laser verde sobre un cielo estrellado, se ve un haz que parece llegar a las estrellas Sin embargo con otro rojo no se ve su trayectoria ¿cómo lo puedes explicar?

31.-Los puntos de la pantalla de TV tienen los tres colores, rojo, verde y azul (RGB), ¿sabes por qué?

32.-La luz blanca ¿es pura o compuesta de otras? Explícalo

33.-En las fotos de la superficie lunar, el cielo se ve negro ¿ cómo lo explicas?

34.-Tres rayos de luz roja incidentes sobre un prisma se desvían según el primer dibujo adjunto. Tres rayos rojo, verde y amarillo como se indica en el segundo . ¿Cómo lo haría un único rayo de luz blanca? Dibuja un rayo a la entrada y el rayo (o rayos)a la salida.



ONDAS DE LUZ Y MATERIA

35.- Si se extrae todo aire de una campana no se oye el sonido de un despertador en su interior¿ se vería la luz de una pequeña linterna encendida?

SI ☐ NO ☐

¿Por qué?

36.-De los siguientes fenómenos, algunos tienen comportamiento de onda y otros no. Destaca con una cruz los que lo sean y justifícalo brevemente en cada caso.

Tsunami ☐

Sonido ☐

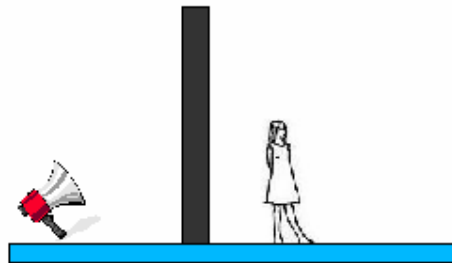
Piedra que cae ☐

Luz ☐

37.- Cuando un instrumento emite una nota musical ¿llegan las partículas de aire inicialmente perturbado hasta nuestro oído?

SI ☐ NO ☐ NO SÉ ☐

38.-¿Cómo explicas que oigamos el sonido de un foco sonoro que está situado detrás de una tapia muy gruesa totalmente insonorizada? Ayúdate de un dibujo con la emisión del sonido



39.-Cuando miras de noche a un foco lejano, al cerrar levemente los ojos se observa que aparecen rayas largas luminosas ¿Cómo lo explicas?

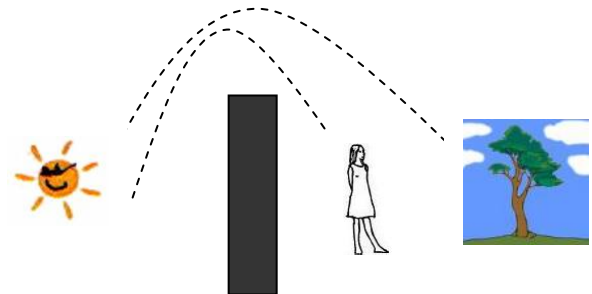
40.- Si miras al sol de frente con los ojos entreabiertos, se ven destellos de varios colores.¿De dónde proceden?

41.-¿Puedes explicar que en ciertas condiciones, luz más luz puede dar oscuridad?

42. En un día soleado, si nos ponemos detrás de una tapia, vemos el árbol porque :

- La luz se dobla a través de la pared. ☐
- Vemos porque la visión de los objetos no tiene que ver con la posición del sol ☐
- Por otras razones (explícalo) ☐

completa tu explicación ¿Puedes corregir el dibujo?



43.--¿Sabes cómo se forman los colores del arcoiris? ¿ Por qué en ocasiones sólo se ve un trozo de arco?

VISION

44.-Cuando inicias la observación de un objeto pequeño situado en el suelo ,debes fijarte en él un rato hasta que lo percibes con nitidez. ¿Puedes explicar por qué? (puedes ayudarte de un esquema ocular)

45.-¿Qué influencia tiene el cristalino (o lente) en la observación de un objeto? ¿ y la retina?

46.-¿Qué es la miopía?

¿ la presbicia?

¿La hipermetropía?

¿El astigmatismo?

GRACIAS POR TU COLABORACION

ANEXO II

LOS CUESTIONARIOS POSTERIORES PARA ALUMNOS



CUESTIONARIO DE LA HISTORIA Y DIDÁCTICA DE LA OPTICA FISICA PARA ALUMNOS DE SECUNDARIA . CURSO 2006/07

(FORMULARIO POSTERIOR A LA ACCIÓN DIDÁCTICA)

FACULTAD DE EDUCACIÓN. DEPARTAMENTO DE CIENCIAS EXPERIMENTALES.

CENTRO.....CURSO CONTROL.....
EDAD.....FECHA DE LA PRUEBA.....

MUESTRA TOTAL: 32 ALUMNOS/AS

NOTA: os ruego que dediquéis cierta atención a esta encuesta pues quiero comparar sus resultados con los de otro centro y extraer después consecuencias para acciones futuras.

ITEM A EVALUAR: EMPATÍA CON LA CIENCIA

1. De vivir en la edad media ¿qué temas te interesaría investigar? Idear aparatos para vivir mejor (nuevas telas, faroles de aceite más luminosos, etc), ☐ curar enfermedades ☐ construcciones y aparatos para defenderte de otras culturas (murallas, ballestas, pólvora,...) ☐ conocer los fenómenos naturales (arco-iris, por qué llueve, las estaciones, la astronomía,...) ☐ mejorar el diseño de barcos más rápidos para conseguir el protagonismo en el comercio de la seda ☐ Construir nuevas armas para asegurar la primacía económica y política ☐
2. Cuando comprendes un principio físico o resuelves un ejercicio difícil , ¿disfrutas intelectualmente o sólo sientes que has superado un obstáculo incómodo? Disfruto ☐ me servirá para aprobar ☐
3. ¿Te detienes en las páginas científicas de la prensa como la página Aula o bien a observar los documentales de TVE2, Redes, Nacional Geographic, Discovery Channel,...? sí ☐ nunca ☐
4. Científicos consagrados ganan bastante menos que otros profesionales menos cualificados, ¿te parece justo? sí ☐ no ☐

ITEM A EVALUAR: PERCEPCION SOCIAL DE LA ACTIVIDAD CIENTÍFICA

5. Las cualidades de un buen investigador actual en en genética, nanotecnología, deberían ser (puntúa de 0 a 5):
gran inteligencia y formación cultura científica cultura humanista creatividad saber trabajar en equipo un buen expediente académico
humanidad una gran curiosidad ambición económica sociabilidad
medios abundantes en su trabajo un entorno social inmediato que le refuerce moralmente
devoción por el conocimiento disposición a comunicar sus avances a otros
compañeros reconocimiento público de los avances de otros compañeros estabilidad laboral y familiar

6. La creciente contaminación y cambio climático ¿son culpa de los científicos? sí ☐ no ☐
7. la actividad científica del organismo estatal CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas) financiado con dinero público, ¿tiene una función social o tecnológica inmediata o admite investigar cualquier tema(ciencia básica)? social ☐ básica ☐
8. ¿Podría un científico publicar cualquier artículo en una revista especializada? sí ☐ no ☐ ¿por qué?
9. ¿Puede un país moderno vivir sin investigación o le basta con adquirir patentes de países más desarrollados? Saldría perjudicado ☐ basta con comprar patentes ☐ ¿Por qué?
10. ¿El científico/a de los países tercer mundistas, sin dinero ni equipos ,desarrolla menos trabajos que sus compañeros occidentales: porque le faltan medios económicos ☐ porque le falta equipo humano ☐ porque tiene menos información ☐ porque tiene menos estímulos otros (explícalo) ☐

EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

(Es importante que tus respuestas tengan cierta madurez y extensión, que no sean copiadas sino el resultado de la consulta comprendida de textos o informes y que además, sean personales).

11. ¿Qué es una ley física?
12. ¿Y una teoría? ¿Y un modelo?
13. La teoría de la gravitación de Newton servía para calcular órbitas de los cuerpos celestes ¿sigue siendo válida? ¿ Se sigue utilizando?
14. La teoría corpuscular de la luz ¿ qué afirmaba? ¿de quién era?
15. ¿ Y la de los medios de Huygens?
16. ¿Cuál era la más ajustada a la realidad en aquellos momentos?¿por qué?
17. Las últimas teorías científicas ¿describen correctamente la realidad?

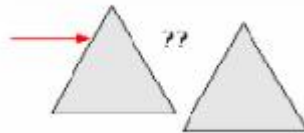
NATURALEZA E INTERACCIONES DE LA LUZ CON LOS CUERPOS (I)

18. ¿Puede un espejo reflejar la oscuridad?
19. ¿Por qué necesitamos luz ambiental para ver los objetos?
20. Sabes que los televisores reproducen cualquier color mezclando adecuadamente el rojo, verde y azul (sistema RGB), y que los artistas lo consiguen mezclando amarillo, cian y magenta en su paleta. ¿ quiere esto decir que la luz natural sólo tiene tres colores? Sí ☐ no ☐
21. La luz transporta energía: sí ☐ no ☐, solo ondas ☐ no, sólo partículas ☐
22. La luz blanca ¿es sencilla o compuesta de otros colores?¿Y la luz roja?
23. Si dos luces, roja y verde se cruzan en un punto y se enfocan sobre una pantalla simultáneamente, se ve un color *magenta* . Si se quita la pantalla, ambos siguen caminos independientes, con colores: rojo y verde por separado ☐ ambos magenta ☐ no lo sé ☐
24. Un papel blanco, ¿qué colores refleja de la luz que le llega? ¿ y uno gris? ¿ y uno negro?

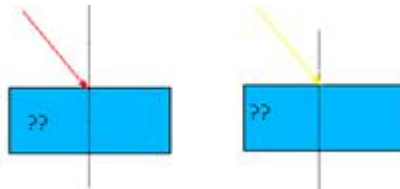
25. ¿Qué ocurre cuando un electrón excitado en un átomo baja a un nivel de menor energía?
26. En un día nublado, ¿tenemos sombra? ¿cómo lo explicas?

NATURALEZA E INTERACCIONES DE LA LUZ CON LOS CUERPOS (II)

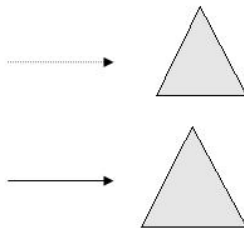
27. Dibuja la trayectoria de un rayo de luz roja que incide sobre un prisma tras el que hay un segundo prisma.



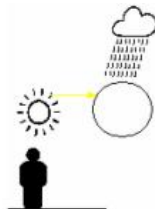
28. Dibuja la trayectoria (o trayectorias) de un rayo de luz roja y otro blanca cuando inciden en la superficie de un vidrio grueso



29. ¿Cómo continúa su camino un rayo de luz blanca que llega a un prisma? ¿Y uno de luz roja?



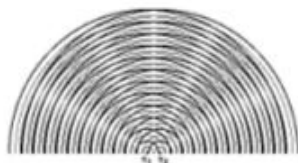
30. ¿Por qué aparecen colores en un prisma al paso de la luz?
31. ¿Por qué se forma el arco-iris? (haz un esquema de la trayectoria de los rayos en el dibujo de la gota de agua ampliada)



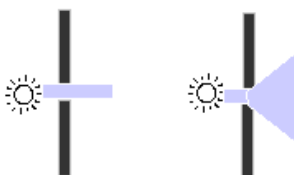
COMPORTAMIENTO ONDULATORIA DE LA LUZ

32. Que característica física diferencia un color rojo de otro verde?

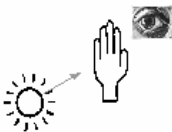
33. ¿Cómo explicas que si dos personas se miran mutuamente ambas puedan distinguir sus imágenes respectivas con nitidez sin que éstas tropiecen por el camino? porque las imágenes están compuestas de partículas que viajan muy distanciadas entre sí ☐ porque se portan como las ondas de agua que siguen su camino independientemente aunque se crucen ☐ otros (explícalo) ☐
34. ¿Qué es luz polarizada? ¿Cómo la obtienes?
35. Si tiras simultáneamente dos piedras al agua, al cabo de los pocos segundos se ven zonas de máximos y mínimos como las de la figura ¿cómo lo explicas?



36. Cuando un haz de luz atraviesa una rendija estrecha, ¿cómo es la trayectoria del haz de luz? : sigue paralelo ☐ se abre en un haz ☐ ¿Por qué?



37. Si cierras dos dedos casi del todo frente a un foco de luz, se ven a su través rayas parecidas a códigos de barra (rayas oscuras y luminosas) ¿cómo lo explicas?



VISIÓN

38. En el interior del ojo hay una lente orgánica convergente llamada cristalino que enfoca las imágenes en la retina, tejido posterior del ojo que hace las veces de pantalla. ¿ Se recoge directa ☐ o invertida ☐ ? ¿Mayor o menor que el objeto real? Mayor ☐ Menor ☐. Haz un esquema de la formación de la imagen de un árbol lejano en la retina
39. ¿Por qué todo el mundo necesita gafas a partir de una cierta edad?
40. ¿Por qué necesitamos un tiempo para distinguir las letras de un periódico un objeto en el suelo?
41. ¿Qué son la miopía y la hipermetropía?. Describe ambos defectos con un diagrama sencillo y la lente que los corrige.

Miope



Hipermétrope



42. ¿Cómo explicas que un objeto grande (una montaña) pueda verse en un instrumento óptico pequeño como es el ojo?

ANEXO III

LOS CUESTIONARIOS A PROFESORES



CUESTIONARIO DE LA HISTORIA Y DIDÁCTICA DE LA OPTICA PARA PROFESORES DE SECUNDARIA . CURSO 2005/06

FACULTAD DE EDUCACIÓN. DEPARTAMENTO DE CIENCIAS EXPERIMENTALES.

Años de servicio a) 0-5 b) 6-15 c) 16-25 d) más de 25

NUESTRAS CONCEPCIONES DE LA ENSEÑANZA DE LA CIENCIA

- 1.- Deberíamos enseñar (sin la presión de la Selectividad):
más cosas menos , pero de modo más exhaustivo
- 2.- Puntúa de 0 a 5 cada ítem: En nuestra estrategia de objetivos a conseguir (sin la presión de la Selectividad) , nuestros alumnos deberían: priorizar la consecución de destrezas en desarrollos formales
la comprensión cualitativa del fenómeno físico analizar el contexto sociológico en el que se comprende mejor el nuevo concepto o modelo
- 3.-Independientemente de los condicionantes del programa, valora de 0 a 5 la importancia de
enseñar ciencia enseñar sobre la ciencia y sus impactos sociales enseñar destrezas (enfrentarse a problemas nuevos, trabajo en grupo, habilidad experimental)
- 4.-La ciencia que enseñamos :
debe ser neutra debe tomar partido sobre riesgos y perjuicios de sus contribuciones debe dar herramientas al alumno para que tome sus propias conclusiones
- 5.- Dedicar tiempo a explicar cómo y dónde se hace ciencia
esporádicamente lo justo siempre que puedo
- 6.-Qué puntuación (de 1 a 5) otorgas al poso científico que debiera tener el ciudadano que no ha estudiado una carrera científica ni técnica:
rigor de razonamiento 2 cultura científica 2 conocimientos básicos que pueda aplicar a la interpretación de fenómenos meteorológicos o a las reparaciones domésticas. 2 criterio para decidir en temas ecológicos o energéticos 4 otros (especificar)

LA VALORACIÓN DEL PROFESORADO EN EPISTEMOLOGÍA E HISTORIA DE LA CIENCIA

- 7.- ¿Dedicar tiempo a relatar historias de científicos?
nunca a veces en cada tema
- 8.- Es un hecho que los profesores de física y química carecemos de una formación humanista del fenómeno científico. Si se organizaran cursos de actualización relacionados con la epistemología o historia de la ciencia,
asistiría si estuvieran planificados con rigor aunque los considero interesantes, no iría
no los considero interesantes para mi labor
- 9.-Si tuvieras dicha formación:
Orientaría de otro modo mis unidades didácticas priorizando el cumplimiento de los programas
Aún así no lo haría
- 10.-Da una puntuación de 0 a 5 a que los currículum de física priorizaran (si no tuvieras condicionantes oficiales) :

programaciones basadas en la Historia y epistemología de la Ciencia , en el estilo del texto de Holton
 programaciones con una clara orientación CTS programaciones con un desarrollo claro
 de los conceptos científicos al estilo de los clásicos PSSC , CHEM o Nuffield Otras (explícalo) ☐

ACTIVIDADES MOTIVADORAS

11.- ¿Qué estrategias de organización de la clase te son más rentables para la motivación del alumnado?
 (no tienen por qué ser excluyentes)

Exposiciones magistrales muy cuidadas y amenas con espacios para la interacción y la resolución de problemas

Informes de laboratorio Pequeñas investigaciones de cocina o taller
 Las experiencias de cátedra en gran grupo otras
 Informes sacados de Internet, libros de divulgación o Enciclopedias
 Historias de científicos en su contexto social Prácticas de laboratorio
 Otras (enúncialas)

INCIDENCIA DE LAS ACTIVIDADES HISTÓRICAS EN LA COMPRENSION DED LOS CONCEPTOS

12.-La introducción como actividades prácticas del análisis de textos científicos significativos en los temas :

Me parece que ayudan a la comprensión de los fenómenos no le veo rentabilidad para la
 eficacia en la adquisición de los conceptos

13.-El incluir experiencias de cátedra o de grupo históricas (los Experimentum Crucis como la
 descomposición espectral de los colores, etc) dentro de los programas , favorecería la comprensión de
 los conceptos actuales la retrasaría no la afectaría

TOPICOS CONVENIENTES

14.-En tus explicaciones sobre óptica ¿consideras importante considerar a la óptica de rayos como un
 caso límite del principio de Huygens-Fresnel? sí no

20.-Marca los tópicos cuyo conocimiento cualitativo debería incluirse en una programación convencional
 de Óptica Física de enseñanza secundaria:

interferencias luminosas concepto de onda ondas estacionarias difracción
 ondas coherentes dispersión de la luz carácter finito de la velocidad de la lu
 polarización naturaleza física del color visión del color comprensión del arco-iris
 color rojo del sol vespertino color azul del cielo color blanco de las nubes la luz como
 onda electromagnética polarización de la luz dispersión en prismas Laser visión
 y sus defectos efecto fotoeléctrico bases cuánticas de la óptica percepción
 visual holografía interferencias cromáticas código de barras
 Otros.....

TOPICOS DIFÍCILES

21.-De los tópicos siguientes, marca aquéllos en los que nuestros alumnos salen con una comprensión
 cualitativa confusa al final del Bachillerato

interferencias luminosas concepto de onda ondas estacionarias difracción
 redes de difracción espectro electromagnético ondas coherentes carácter finito de la
 velocidad de la luz naturaleza física del color visión del color óptica atmosférica(arco-
 iris,...) la luz como onda electromagnética polarización de la luz dispersión en
 prismas visión y sus defectos efecto fotoeléctrico
 Otros (especificar)

ANEXO IV

EL INFORME PERSONAL



CURSO 2006/07
IES GREGORIO MARAÑÓN DPTO DE FÍSICA Y QUÍMICA
TRABAJO VOLUNTARIO DE LOS CURSOS 2º BCN Y N3Z DE
FÍSICA SOBRE NATURALEZA, CONCEPTOS Y FIGURAS
HISTÓRICAS DE LA CIENCIA

ALUMNO/A.....

CURSO.....

NOTA :El objeto de este trabajo es que el alumno, tras consultar la bibliografía reseñada, responda *con su propio lenguaje*, *de modo inteligible* y *original*, a las preguntas que se plantean. A efectos de calificación no se valoran las copias textuales de textos de Internet, de otros compañeros, o de libros. La extensión del trabajo debe estar entre ocho y diez folios escritos con el procesador *Word* en la letra *Arial* tamaño 10. En las cuestiones en que se debe responder a conceptos científicos, deberán aparecer gráficos ilustrativos bien sea manuscritos o digitales, descritos convenientemente. El desarrollo suficiente en extensión y calidad del trabajo se valorará con un máximo de **1** punto a sumar a la calificación final del curso en la materia.

1. Define brevemente las diferencias entre una ley física, una teoría y un modelo. Ejemplos de teorías obsoletas
2. ¿Cómo explicaba Newton el efecto de las mareas de Hanöi? ¿cómo surge la idea de los experimentum crucis?: fundador, significado.
3. Describe el primer Experimentum que hizo Newton y sus conclusiones ¿fueron ciertas? ¿Para qué y cómo utiliza Newton el concepto de mínima desviación en un prisma en su Experimentum?
4. Resume las ideas principales de Newton respecto a la luz: ¿eran para él ondas o corpúsculos? ¿Cómo explicaba la composición de los distintos colores?
5. ¿El escritor Goethe y el matemático Euler discrepaban de sus tesis? Cómo? ¿qué otra propuesta daban?
6. ¿Un experimento es una justificación definitiva de una teoría o sólo la ilustra? ¿Qué hace en Física que una teoría se sustituya por otra? ¿Es la nueva teoría cierta?
7. Describe la idea y justificación del éter para los griegos y para los científicos del siglo XIX (Young, Fresnel y Maxwell)
8. Describe cualitativamente la experiencia de la doble rendija. Justifica cómo se aplica a establecer la teoría ondulatoria.
9. ¿Qué son los fits de Newton?
10. ¿Qué es polarización de una onda?
11. ¿Qué experimentos justifican el carácter transversal de las ondas de luz?

12. ¿En qué condiciones una onda de luz sumada a otra dan oscuridad?
13. ¿Qué es la difracción de los frentes de las ondas planas de agua? ¿Cómo se comportan al atravesar una rendija delgada y otra ancha?
14. Podemos decir que, tras la derrota de las tesis corpusculares de Newton, la luz es una onda transportada por un medio? ¿Por qué?
15. ¿Qué tienen en común una onda electromagnética, una de luz roja y otra infrarroja? ¿En qué se diferencian?
16. ¿En qué consiste la mancha de Poisson? ¿Qué tuvo de especial?
17. ¿Qué comportamiento tiene el espato de Islandia frente a un rayo de luz? ¿Quién descubre las propiedades del espato de Islandia?
18. Algunos pescadores utilizan gafas de sol “Polaroid” para ver el fondo de los ríos. ¿Qué tienen de especial? ¿Qué propiedad se pone en evidencia de la luz reflejada?
19. Isaac Newton es un ejemplo de genio científico autodidacta ¿necesitó de la herencia cultural para sus trabajos de la gravedad y la luz? ¿Cuáles?

BIBLIOGRAFÍAS

1. WIKIPEDIA y otras fuentes de Internet
2. CD “La senda de Aton” (Unidad Didáctica, Lecturas de Óptica I y II)

ANEXO V

LA SENDA DE ATON: LECTURAS DE OPTICA



5.1 LA MIRADA DEL BASILISCO



fig. 1.1 Basilisco del bestiario medieval

Basta imaginar la existencia de un condenado a una celda oscura para entender la importancia de la visión. Cuando centramos nuestra atención en un árbol en un día con nubes o despejado, situado en el exterior, percibimos claridad aunque no incida luz directa en nuestros ojos, pero si hay oscuridad, no lo vemos. Además, al poco rato sus formas se dibujan con nitidez, pero los objetos más próximos o lejanos que le rodean aparecen desdibujados. Metidos en la piel de cualquier observador inquieto, las preguntas frente a este fenómeno se suceden en cascada:

¿Qué es la luz? ¿De dónde viene? ¿Cómo llega la información visual a nuestro cerebro? ¿Cómo es que teniendo dos ojos vemos una imagen única? ¿Cómo es que siendo tan pequeñas las imágenes que se recogen en la retina, las vemos de tamaño natural? ¿Qué ocurre dentro de mi ojo? ¿Por qué sólo vemos si es de día o hay una lámpara próxima? Y finalmente, cuando esto ocurre ¿Cómo se procesa esta información hasta que llega a mi conciencia? (Park, 1997).

Responder a ellas nos puede ayudar a diseñar mejores objetivos fotográficos, telescopios, teodolitos, microscopios, etc., pero existe además un motivo profundo que ya esgrime Aristóteles (1970) cuando justifica el deseo del conocimiento en la aventura humana al decir que

...Valoramos especialmente el conocimiento de las cosas importantes para nosotros como un medio para acciones sabias y profundas satisfacciones

Cuando se intentan respuestas apoyados en poco más que nuestro sentido común y la experiencia, pueden surgir cosas disparatadas. Por ejemplo, un erudito renacentista, divulgador de Aristóteles en la Universidad de París, Joannes Versoris (1491), justificaba su teoría de que la visión era el resultado de la emisión de una radiación visual que llegaba al objeto y era posteriormente reconocido por el ojo, argumentando cuatro motivos:

- *De los ojos debe salir una radiación, pues cuando queremos ver algo con más nitidez, cerramos levemente los ojos. Si la visión fuera pasiva, los abriríamos para favorecer que entrasen los supuestos rayos y no es así como ocurre.*
- *Si los gatos y los lobos ven en la oscuridad, es evidente que emitan estos rayos.*
- *La visión es una actividad y el ojo un agente, luego éste debe enviar alguna sustancia al objeto.*
- *Si una mujer con menstruación mira un espejo, o un basilisco mira a un hombre, tanto uno como otro resultan dañados...*

El basilisco era un animal mitológico del que se habla en todos los bestiarios de la cultura medieval (Beauvais, 1980). Se le suponía tener cabeza y patas de gallo y cuerpo de serpiente. Se alimentaba succionando la leche de las mujeres durante las noches sin que se dieran cuenta y tenía un poder maléfico especial pues si alguien se enfrentaba a su mirada podía perecer. Esta superstición daba soporte a otras como el mal de ojo, y a la referida concepción extromisiva de la visión.

Nuestras respuestas actuales son más acertadas pero no definitivas. Podemos en consecuencia mantener nuestra sonrisa condescendiente o hacer un esfuerzo de investigación histórica que nos ayude a entender cómo se pueden emitir argumentos como éste así como los motivos por los que no seguimos pensando de ese modo. Algunos pensamos que sigue teniendo vigencia para nuestra salud intelectual conocer los largos itinerarios que llevaron a la ciencia occidental a superar mitos y descubrir claves esenciales de la Naturaleza para mostrarlos así a las nuevas generaciones.

La aventura intelectual del conocimiento de la visión, la luz y la óptica es de las más largas de la Historia en donde los avances y retrocesos se mezclan, pero también la que más atracción suscita entre las ramas científicas. Cuando la Biblia habla de que el Creador en su primer día ordena, *Hágase la Luz*, se entiende que ello, más que posibilitar la visión, es un acto de creación que transforma la oscura, húmeda y caótica existencia en mar, tierra, un luminoso jardín, un hombre y una mujer. A pesar del tiempo transcurrido desde sus inicios, esta rama de la ciencia no ha perdido un ápice de su interés y su misterio.

Enfrentado a la tarea de bosquejar una historia de los inicios de la óptica he decidido describir fundamentalmente el desarrollo de los conceptos desde la cultura griega hasta el siglo XIX cuando James Clark Maxwell asienta su teoría electromagnética, más que anécdotas o biografías. Cómo se formalizan éstos a partir de las intuiciones iniciales, de las metodologías que los hacen avanzar tímidamente, de las condiciones sociales y las personalidades de sus protagonistas hasta asentarse finalmente en los pilares de la ciencia.

Si apostamos por este proceso en el aprendizaje de la óptica, el lector puede pensar que el tiempo empleado es excesivo y que le hubiera salido más rentable trabajar conceptos y procesos descontextualizados. A lo mejor ello es cierto si se buscan resultados más inmediatos para diseñar nuevos ingenios, pero si lo que se pretende es transmitir claves para abordar con éxito los problemas y reivindicar el goce intelectual que supone entender los conceptos científicos desde una dimensión global, daremos las condiciones para formar individuos críticos más capaces de enfrentarse a situaciones de cambio a las que parece abocar de modo constante la sociedad que nos toca vivir.

5.1.1 El mundo clásico

Poniendo en boca al conocido historiador de la óptica, Vasco Ronchi (1956), en la Grecia de los años 600 AC, algunos hombres fueron famosos por su sabiduría. No fueron profesores como Platón o Aristóteles que vivieron cien años más tarde sino profesionales, políticos o militares que decidieron buscar explicaciones razonadas a lo que era el mundo, la naturaleza y los grandes problemas de la vida humana. Sólo nos quedan fragmentos de sus libros escritos por otros más tardíos para ilustrar algunos puntos de su vocabulario, gramática u opinión.

El primer lugar de referencia en el tiempo es la ciudad de Mileto, al sur de Efeso que controlaba el comercio hacia el Mar Negro y las costas del norte y en el siglo VI AC, era la ciudad más rica de Grecia. Probablemente es allí donde el público culto miraba hacia arriba, (las estrellas y las nubes,...) y abajo (la tierra, fenómenos geológicos,...) en sus ocios, y se preguntara de qué están hechos los cuerpos celestes y terrenales, y qué principios regulan los cambios materiales y los procesos. Cuando uno repite este ejercicio constata que vivimos en un mundo de gran variedad. ¿Son todas las sustancias diferentes y constantemente mutadas en su naturaleza, o son manifestaciones del mismo principio que no cambian?

Tales de Mileto sugirió que el agua era el principio fundamental. Según Aristóteles, para él la Naturaleza es vida y la vida necesita agua, ... La respuesta es simplista, pero no el propósito que la anima. En nuestra cultura respondemos buscando pocas partículas y fuerzas fundamentales desde el principio de economía y unificación de las causas. ¿Hay demasiada diferencia?



fig . 1.2
La Grecia Helénica

Tras él vino una fase de lucidez en ramas como el arte, la literatura, la astronomía, las matemáticas o la filosofía, que pocas veces se ha repetido a lo largo de la historia. En lo que se refiere a nuestro tema, una y otra vez, el mundo griego intentaba comprender el mundo externo inventando términos de los que fueron pioneros ¿qué es conocer? ¿qué es ciencia? ¿cómo es la percepción?...

El mundo griego del siglo V AC fue el de la plenitud de la literatura, el IV el de la Filosofía y el III el de la Ciencia. Esta última disciplina con tópicos como la matemática, mecánica e hidrostática tienen sus referencias en Euclides, Arquímedes y Epicuro... Sin embargo el interés por la visión ya se suscita con un siglo de anticipación, en unas fechas en las que este fenómeno no se podía encuadrar aún como ciencia. Nace como un apéndice de la Filosofía y las religiones procurando responder al modo en llega a nosotros la información externa.

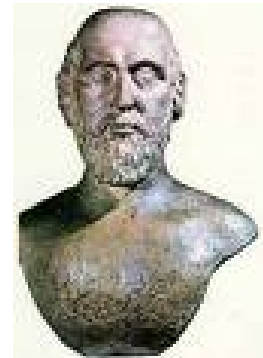
El citado Ronchi, da las claves para entender el motivo por el que genios como Aristóteles se desentiendan de la confrontación de la experimentación aunque no de su experiencia cuando explican el mundo físico. En efecto, el conocimiento científico se entendía superior, ajeno al mundo cambiante y a menudo engañoso que nos proporcionan los sentidos. Habría tres clases de conocimiento ordenadas por importancia, el metafísico, el científico y el artístico. Este último, entendido como artes manuales sometidas a la experimentación, no se consideraba digno de interés.

No es de extrañar por tanto, que aparezcan en esta cultura casi tantas opiniones como autores a las teorías de la luz y la visión, aunque básicamente todas girasen en torno a cuatro escuelas. Todas ellas se centran más en explicar la visión como algo más inmediato y conectado con la percepción como forma de conocer la realidad externa. Al principio las teorías aparecieron mezcladas con argumentos poéticos, religiosos y supersticiones de los que se fueron desligando hasta pretender

sólo explicaciones razonadas. Faltas de la confrontación experimental a la que renunciaban en muchos casos, todas ellas persistieron durante siglos con intensidad variable, hasta que los genios del árabe Alhazen (s X) y del alemán Kepler (s XVII) las sintetizaron y superaron. Es por ello por lo que considero importante una revisión superficial de las teorías de ambas versiones investigando, más allá de las simplificaciones frívolas, los motivos que las hicieron plausibles

La teoría extromisiva de la visión

El filósofo Alcmaeon (siglo V A.C.) decía que el hecho de que al sufrir un golpe en los ojos observemos luces y de que los ojos de algunos animales fueran capaces de moverse fácilmente en la oscuridad como ocurre con los gatos, sugiere la posibilidad de que algún tipo de radiación interna salga hacia los objetos visibles para reconocerlos, interaccionar con ellos y devolvernos la información. Esta idea básica, aderezada con otros argumentos, explicaba un buen número de hechos, y aunque tenía puntos débiles, fue la predominante en la Antigüedad.



Ya Pitágoras sobre el 550 AC defiende la existencia rayos visuales. Era una idea atractiva para los griegos amantes de la Geometría que explica cómo es que objetos de gran tamaño pueden encajar en la perspectiva de la imagen que se percibe en función de su tamaño y orientación.

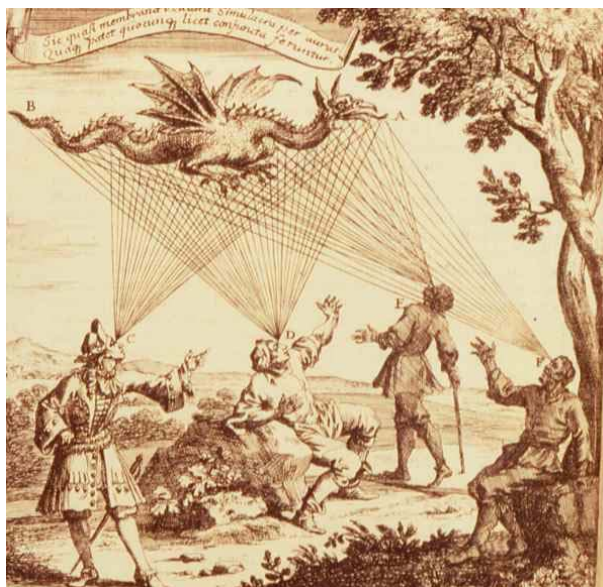


Fig 1.3 Modelo extromisivo de la visión

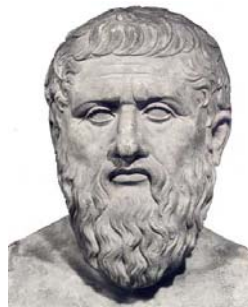
Empédocles de Agrigento (490-435 AC)

Poeta, filósofo, médico y sacerdote. Viajó por Sicilia como profeta y milagrero. Para él, Afrodita puso el fuego en nuestros ojos para conseguir que la visión fuera posible (el *fuego ocular*). Para explicar porqué no podemos ver de noche, argumentaba que nuestra radiación es más débil que la de los gatos, y tuvo que postular una interacción entre los rayos visuales como la emanación del *fuego eterno* elemental y los de la fuente luminosa.

La luz sería debida a emanaciones de partículas emitidas por los cuerpos (Bollack, 1965). La sensación se produce cuando las partículas penetran a través de los poros del órgano sensible. Además se necesita una emisión interna (un fuego interno del espíritu o del alma) que interaccione con él según el principio de que sólo lo semejante detecta a lo semejante:

...Con la tierra vemos la tierra, con agua el agua, con aire el cielo, con fuego, el fuego destructivo.

Este principio se aplicaba a todos los sentidos. El ojo se parece pues a la luz en su transparencia. De igual que modo, extrapolaban hasta la afirmación de que “puesto que tenemos divinidad podemos conocer a los dioses”.



Platón (428-347 AC)

Contemporáneo de Demócrito. Funda la Academia de Atenas en el 387 AC. Diferencia hasta los extremos entre esencia y apariencia (al dibujar un triángulo en la arena el principio es permanente y el dibujo transitorio). Tiene poco interés por el mundo natural. Su único libro al respecto ‘*El Timeo*’, más fantasía que doctrina, está escrito en un tono poético que irritaba la mente analítica de Aristóteles. Para él, en la creación, el divino Demiurgo construye el universo ordenado. El mundo estaría hecho de cuatro elementos que son polígonos regulares.

Los colores son el objeto del proceso visual y la luz es el medio. La visión es el resultado de un triple proceso: el ojo emite fuego. Éste se combina con la luz del día para formar la “*sinaugeia*” (rayo) y los colores salen a rayos del objeto y se combinan con el rayo visual.

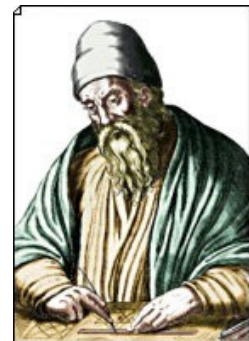
Para Platón (1997) la luz es fuego, entendido como energía. El fuego está en el interior y exterior de los animales. El sol es una luminaria puesta por el Demiurgo en la segunda de las órbitas para que el cielo estuviese iluminado por todas partes. Para explicar la visión, se requiere además del sol, una luz en el interior de los animales que no es capaz de quemar, sólo de producir luz suave. Este fuego, hermano del fuego exterior, fluye a través de los ojos y cuando la luz del día envuelve esa corriente de la visión, cuando lo semejante encuentra a lo semejante, se funde con ello en un solo todo y se forma, según el eje de los ojos un único cuerpo homogéneo. Si este conjunto toca algún objeto o llega a ser tocado por éste, transmite los movimientos a través del cuerpo entero hasta el alma y se produce esa sensación gracias a la cual decimos que vemos: Como él diría: *De nuestros ojos sale una luz similar a del sol*

Proponía una teoría híbrida:

...Son necesarias la luz del calor innato que atraviesa los ojos (la principal), la luz exterior similar a la nuestra, y la que fluye de los propios objetos: sin la conjunción de las tres, la visión no puede ocurrir.

Euclides (300 AC)

Es el principal representante de la teoría (Ferraz, 1965). Afirmó que la visión se produce cuando una serie de rayos visuales en modo discreto se dirigen al objeto, interaccionan con él y devuelven el resultado hacia el ojo. Los rayos visuales integran un cono visual con vértice en el ojo del espectador y base en el objeto. Euclides (1959) afirma que los rayos que salen del ojo forman un cono visual con un número discreto de rayos que viajan en línea recta. A mayor número de rayos, mayor agudeza visual del sujeto.



Enuncia sus siete postulados que tuvieron vigencia hasta el Renacimiento:

- Los rayos rectilíneos que proceden del ojo divergen indefinidamente
- La figura que forma el conjunto de rayos es un cono con vértice en el ojo y base en el objeto visto.
- Se ven las cosas sobre las que cae el rayo visual y no se ven aquéllas sobre las que no cae.
- Las cosas vistas bajo un ángulo mayor se ven mayores, y las vistas bajo un ángulo menor se ven menores.
- Las cosas vistas. Con rayos visuales más altos se ven más altas y las observadas por rayos visuales más bajos se ven más bajas

- Cosas vistas por los rayos más lejos hacia la izquierda se ven más lejos a la izquierda y simétricamente con las vistas con rayos situados más extremos hacia la derecha.
- Las cosas vistas bajo más ángulo se ven más claras.

El poder de esta teoría, a pesar de lo discutible de la existencia del rayo visual, viene de su coherencia interna: las distintas secciones del cono visual explican el pequeño tamaño de la imagen en el ojo, el hecho de que necesitemos un tiempo para encontrar un pequeño objeto en el suelo, y de haya zonas de mayor agudeza visual visión que otras, explica la hipótesis de la discontinuidad de los rayos visuales. Es fundamentalmente una teoría matemática que no pretende investigar la naturaleza de esta radiación, pero se demostró una herramienta potente para interpretar la perspectiva de las figuras percibidas y quizás por ello aguantó tanto tiempo.

Ptolomeo (127-148 DC)

Autor de *‘El Almagesto’*, título árabe de *‘El más grande’*, que es el gran modelo geocéntrico del Universo antiguo y de la *Óptica* (Ptolomeo, 1959). Estudia la refracción, reflexión, y la visión binocular. Relata que para la percepción del objeto hace falta el color pero también su forma, posición y movimiento. La última fase del proceso visual ocurre cuando los rasgos primario y secundario del objeto visual se someten al *juicio* (*“sensus communis”*). Sólo entonces la sensación se hace percepción.



Apoya la teoría del cono visual con la aportación personal de que el cono debe ser continuo, formado por un número infinito de rayos

Es el primero en mezclar colores por giro de una rueda de alfarero y mirando cómo, vistos a distancia, los colores se mezclan. Es pues precursor de la escuela puntillista.

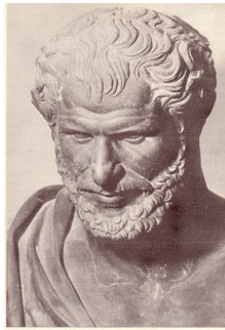
Las críticas que no podía soportar esta teoría eran de una parte cómo es posible ver las estrellas en la noche supuestas a enormes distancias y explicar la naturaleza corpórea o no, de estas radiaciones que se emitían constantemente sin que el ojo se desgastara.

Teoría intromisiva de la visión

Defiende el proceso inverso al afirmar que todos los objetos emiten *“eidola”*, término griego de imágenes o *“simulacra”* en el término latino, integrados por átomos de distintas características. Cuando miramos a una montaña, millones de átomos, unidos en una especie de corteza o piel de

serpiente, emanan unidos de ella hasta nuestros ojos impresionándolos. Esgrimen como argumentos a su favor el hecho de podamos observar estas imágenes en los espejos, el agua y la córnea del observador y la observación de postimágenes que surgen cuando observamos un objeto brillante durante un rato.

Para Leucipo de Mileto el aire entre el ojo y el objeto recibe una impronta bajo el efecto de la presión de ambos (aparece la idea del medio de transmisión). De cada objeto sale una emisión que se imprime en el ojo húmedo.



Democrito de Abdera (460-370 AC)

Es el máximo representante de esta escuela aunque desgraciadamente no tenemos su obra escrita. La recuperan Epicuro (341- 270 AC) y el poeta romano Lucrecio (95-52 BC). Gran viajante. Llega a Egipto y Babilonia donde practica la medicina, música, astronomía y matemáticas.

Es menos conocido que relaciona la imagen de la córnea con el proceso de la visión.

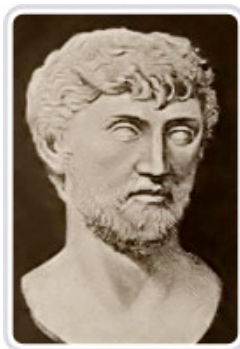
Epicuro (341- 270 AC)

Es el profeta del refinamiento y de la búsqueda de la felicidad. En los temas científicos adopta y recoge el pensamiento de Demócrito.

En una carta de Epicuro a Herodoto dice que la visión podría formarse por la formación de “*eidola*” (ídolos o imágenes) salidos de la corteza que emanarían continuamente de todos los cuerpos, la cual estaría provista de infinidad de corpúsculos que podrían desprenderse sin perder su orden, conservando su conjunto en forma primitiva para llegar definitivamente a penetrar en el ojo. Estos átomos que abandonan el cuerpo, serían repuestos por otros nuevos que ocuparían los huecos libres. Sucede lo mismo que con el oído o el olfato, que se producen cuando una perturbación viene de un cuerpo que emite un ruido o un olor. Otro argumento que la refuerza es el hecho de que en un teatro las telas de colores vivos tiñen de su luz los objetos circundantes. El frío emana de los fluidos, el calor del sol, el salitre que estropea los cimientos de las viviendas. Estas

imágenes que se ven en la superficie del agua o en los espejos, sólo son debidas a las emisiones de estas imágenes. Estaríamos pues en presencia de las huellas de las “*eidola*” ¿por qué no va a ocurrir lo mismo de modo general? Cuando alude a que las imágenes de los espejos son simétricas al objeto pero no idénticas

Consciente de que su teoría tiene carencias importantes, no es radicalmente extremisivo, pues admite que *la opinión puede falsear los resultados de la visión y habría que frenarla*. Las imágenes vienen de los cuerpos trayendo el color y las formas pero pueden traerse también de otra forma



Lucrecio (95-52 BC)

Siglos más adelante, el poeta romano Lucrecio (1983), retoma de modo más radical que Epicuro la teoría atomista. Define que el *énfasis es el encuentro frente al ojo de las imágenes externas y de la reflexión en la córnea*.

Entresacamos algunos párrafos de su obra ‘*De Rerum Natura*’:

...Digo que de la superficie de todos los cuerpos emanan efigies, como membranas o cortezas porque tienen la misma forma que de los cuerpos de los que se escapan para expandirse por los aires”...

...En un teatro, las telas de color vivo tiñen con su tono las personas y las cosas vecinas. Si este color se escapa de las telas para depositarse en los objetos vecinos, ¿por qué no se podría admitir un fenómeno general semejante?..”

Compara la luz con los olores, el calor y el humo y otras emanaciones

...Mientras que la luz no encuentra obstáculo por su extrema delicadeza las otras son dispersadas por no encontrar camino en línea recta

Percibe que las imágenes vistas en el agua y los espejos son en todo semejantes a los objetos y sólo pueden ser formadas por la imagen misma de los objetos

Sin embargo, la propuesta atomista tenía demasiadas lagunas para muchos. : Supuesta la imagen “*eidola*” de una gran montaña, ¿cómo es que nuestro ojo puede reducirla hasta su pequeño

tamaño? ¿cómo es que si nos alejamos de ella su tamaño relativo cambia? ¿cómo es que si una gran multitud ve la misma montaña, las imágenes que se mezclan no pierdan su identidad?...

Este mismo argumento lo refuta Macrobo en sus ‘*Saturnales*’ cuando en los diálogos entre Disaurus y Eustatus pone en boca de éste último sus argumentos contra las imágenes extromisivas:

...También le pediría a este filósofo si es sólo cuando uno quiere ver, que las imágenes salen de los objetos, o si incluso cuando nadie mira, las imágenes salen de todas partes. Porque si defiende la primera proposición le preguntaría bajo qué poder están estos simulacros para que puedan estar siempre a disposición del que los mira de manera que una quiera girar el rostro, tantas veces se girarán éstos. Si defiende la segunda, le preguntaría cuánto tiempo quedarán sus partes coherentes, supuesto que no tienen ningún lazo de unión

...Sin embargo, esta opinión está desmentida por el hecho que quien contempla su imagen en un espejo, la ve como si se hubiera girado para verle, mientras que siendo parte de nosotros en una posición recta, debería, una vez separada de nosotros, mostrar su parte posterior de manera que la izquierda responda a la izquierda y la derecha a la derecha. El actor que se quita la máscara la ve del lado que cubría el rostro.

...Si defiende la primera, ¿quién podrá creer que así que uno haya girado los ojos vendrán a su encuentro las imágenes del cielo, de la tierra, de los ríos, las praderas, los barcos, de los rebaños, y de una multitud de cosas que vemos de un golpe de vista mientras que la pupila es extremadamente pequeña? ¿Y cómo se verá todo un ejército?

...¿Los simulacros partidos de cada soldado, se agruparán, y tal como están alineados, penetrarán en los ojos del espectador?

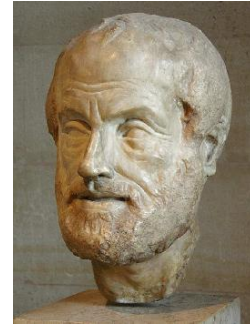
...¿Pero por qué perder las palabras para combatir una opinión tan inconsistente, ya que ella se refuta a sí misma por su vanidad?”

Sus argumentos no eran de gran peso, pero sus contrarios, del tipo platónico, no son menos discutibles:

...Tres cosas por tanto nos son necesarias para que la Visión se pueda efectuar: la luz que emitimos nosotros, el aire interpuesto que debe ser luminoso, y el cuerpo, que por su encuentro, termina la tensión...

Aristóteles (384-322 AC)

Consciente de las insuficiencias de ambas teorías propone superarlas con otra que preludia las posteriores teorías ondulatorias. Para superarlas, propone que la forma impresiona el ojo sin transporte de materia. La percepción para él, es el proceso por el que las formas del mundo externo afectan al órgano visual así como la cera se impresiona por un sello sin intercambio de materia).



Continúa argumentando sobre las diferencias entre el medio oscuro e iluminado:

...Cuando el medio está en reposo, hay oscuridad, Excitado por el fuego de un objeto, el medio pasa al estado activo y se torna transparente, de modo instantáneo. Los colores del objeto pueden entonces pasar hasta nuestros ojos transportadas por el aire que llegan a nuestros ojos. (Aristóteles, 2000)

Para él, la luz es un estado incorpóreo del medio. Es como un nuevo estado del medio antiguo. El ojo (acuoso) forma parte del medio homogéneo, capaz de transmitir movimientos del objeto al observador en un proceso instantáneo. Si el transparente es el medio (aire, agua o cristal), la luz sería un estado del transparente resultado de la presencia del fuego.

La existencia de la radiación visual la descarta aduciendo:

...En efecto: si fuera incorpórea no podría, porque sólo los cuerpos pueden moverse localmente. Si fuera corpórea, su sitio sería ocupado por dos o más cuerpos (el medio, lo que sale del observador y otras entradas de otros observadores.

Asegura que las formas del objeto son impresionadas en el aire, se crean imágenes. Además la visión no puede alcanzar las estrellas. Además ésta emisión sería aire o fuego. No puede ser aire porque el aire ya es suficientemente abundante afuera y tampoco fuego, porque entonces seríamos capaces de ver en, o a través del agua.

Diferencia entre luz, medio y color (Hett, 1955):

- El transparente más el humor acuoso forman un medio común .El ojo (acuoso) forma parte del medio homogéneo transparente capaz de transmitir movimientos del intelecto al observador. El proceso es instantáneo
- Luz es un estado del transparente resultante de la presencia de fuego.

- Color: lo que está en la superficie de los cuerpos y tiene capacidad de poner en movimiento el transparente. Los cuerpos coloreados producen cambios en el medio que llegan instantáneamente a los humores transparentes del ojo.

Es difícil encontrar fisuras a estos razonamientos pero paradójicamente, esta teoría fue la menos aceptada en su época hasta que el mundo medieval la reivindica de nuevo.

Aristóteles es el filósofo griego que más contrasta su discurso con la realidad. Sus descripciones de plantas y animales evidencian una capacidad e interés por la observación no vistos hasta entonces. Su lenguaje es concreto y coherente, a partir de unos postulados dictados por su sentido común. A partir de él, Filosofía y Ciencia (Aristóteles, 1995) toman caminos distintos.

La escuela fisiológica



Galeno de Pérgamo (130-200 DC)

Enriquece el debate con sus estudios sobre la anatomía del ojo pues ya describe en la anatomía ocular la córnea, el humor acuoso y cristalino, el cristalino la retina y el iris. Pero no se queda sólo ahí puesto continúa la trayectoria del nervio óptico hasta llegar al quiasma en la región interna del cerebro.

En una descripción somera, sus tesis son: *En presencia del Sol, el medio junto con los efluvios, se convierte en una extensión del "Yo". Aunque el "pneuma" no llegue muy lejos, sí lo hace el medio que se transforma en la interacción.* Ello podría explicar que percibamos las estrellas a pesar de su distancia. Este medio activado actúa a modo de bastón en la detección de los objetos.

Destaca la importancia del aire entre el alma y la imagen. La información de la forma y color llega a los huecos del cerebro o consciencia ("*hegemonikon*"). El medio en esta doctrina es activo, al revés que en Aristóteles.

Sus ideas se relacionan con las platónicas: un fluido dirigido del exterior y otro interior que sin salir del ojo, sensibiliza este órgano y le hace apto para ser impresionado por el primer fluido. Su influencia empieza a notarse ocho siglos después fuera del mundo greco-romano cuando Alhazen sintetiza los estudios fisiológicos y geométricos utilizando sus descripciones anatómicas.

El ocaso de los clásicos

Cuando el imperio romano se hace con todo el Mediterráneo, sus intereses por la ciencia son muy escasos. Siguen valorando la cultura griega aunque la vean poco práctica, y de hecho mantienen abiertas la Academia y el Liceo a los que algunos mandan a sus hijos a recibir una educación esmerada. La única figura que destaca en el terreno de la óptica es el poeta Lucrecio, del que ya hemos hablado junto con los atomistas. El filósofo hispano *Séneca* tiene alguna referencia aislada a las lentes. Plinio el Viejo, que muere cuando se acerca a observar la erupción del Vesubio que arrasó Pompeya en el 79 DC se da cuenta de que algunos individuos ven mejor de cerca y otros de lejos. Dice también que los gatos y lobos ven en la oscuridad.

Una vez que llegan los pueblos bárbaros invaden el debilitado imperio, los eruditos emigran a Bizancio donde se quedan y copian los textos griegos antiguos. Allí se conservaron las tradiciones clásicas tamizadas por la cultura oficial. El cierre del Liceo de Edesa, continuación del fundado por Aristóteles, en el 489 DC y el de la Academia neoplatónica de Atenas por orden del emperador Justiniano en 529, provocó un nuevo éxodo de muchos intelectuales y cristianos nestorianos hacia la corte de los reyes Sasánidas de Persia y Siria, donde fueron bien acogidos.



5.1.2 La óptica árabe

Tras el descalabro del imperio romano, el mundo árabe, convertido a la religión musulmana por Mahoma, recogió el testigo del refinamiento y el saber. En sus inicios, los árabes aparecieron como un pueblo tolerante e interesado por la cultura propia y ajena. Se sabe, por ejemplo, que Harun al Rashid (766-809) el V califa Abassid, protagonista de las '*Mil y una noches*', representante del apogeo de la cultura árabe persa, envió agentes a comprar fuera de sus fronteras viejos manuscritos sirios, indios y griegos para su traducción al árabe.

Su interés se extendió tanto a las letras como al mundo natural. Así, Quazvini describe la trompa de un mosquito con tal precisión que hay que pensar que disponía de una lupa. Otro tanto se puede afirmar de la descripción de los ojos del saltamontes que hace Abú-l-Alá al -Maarri.

El interés por la Astronomía se acrecentó por el hecho de que la religión musulmana se rige por el calendario lunar y porque practican cinco rezos diurnos a determinadas horas en las que los fieles se inclinan en cuclillas mirando hacia la Meca. Se rigen por un calendario lunar (el mes del Ramadán es un mes lunar). Ello hizo surgir la necesidad de conocer de forma rápida la hora del día y la noche, para lo que el astrolabio, perfeccionado por Hiparco de Nicea, era el instrumento ideal. Esta familiaridad con su manejo, es probable que influyera en la creación de observatorios y observación de la bóveda celeste y de que la Astronomía fuera considerada una ciencia noble. La mayoría de las estrellas tienen nombres árabes (Débola, Altair...).



fig. 1.4 Astrolabio árabe

En lo que se refiere a la óptica y la visión, continuaron las polémicas del mundo griego, entre sus teorías enriquecidas por las sucesivas aportaciones médicas y fisiológicas, nada desdeñables, pues son las que, lentamente, añadieron la dimensión natural a la investigación y dieron la solución final. Aristóteles cobró un protagonismo mayor al que tuvo en su época y la polémica entre las teorías intromisiva y extromisiva se reorientó hacia los seguidores de Aristóteles y de Galeno. Entre los intelectuales que contribuyeron al desarrollo de la óptica, destacan Al Kindi, Avicena y la gigantesca figura de Alhazen.

Al Kindi (IX AC)

Para él la óptica no es sólo una parte del saber griego para ser comunicado a las nuevas generaciones. Destaca su un gran respeto por los antiguos griegos.

Heredero de Platón, propone que de todos los objetos de la Naturaleza se emiten constantemente distinto tipo de radiaciones. En su obra, '*De radiis stellarum* ' escribe:



...La actividad universal de la naturaleza ejercida a través de la radiación de la energía. Es manifiesto que cada cosa en este mundo, ya sea sustancia o accidente produce rayos a su propio modo como una estrella...." (Lindberg, 1976)

Particularizando esta teoría para la visión, afirma que existe una energía visual que se irradia desde el sujeto hacia las cosas observadas. Su obra más conocida de título '*De Aspectibus*' " en su traducción latina recoge sus tesis sobre óptica.

Es un defensor decidido de la teoría extromisiva de Euclides, si bien añade sus propias puntualizaciones como el hecho de que, paradójicamente, para defender la linealidad de los rayos visuales, demuestra la linealidad de los rayos de luz no visuales argumentando sobre las formas de las sombras. (Hay que suponer que identifica la naturaleza de ambos rayos o al menos sus modos de propagación).

Sigue sosteniendo la extromisión mediante argumentos como los siguientes:

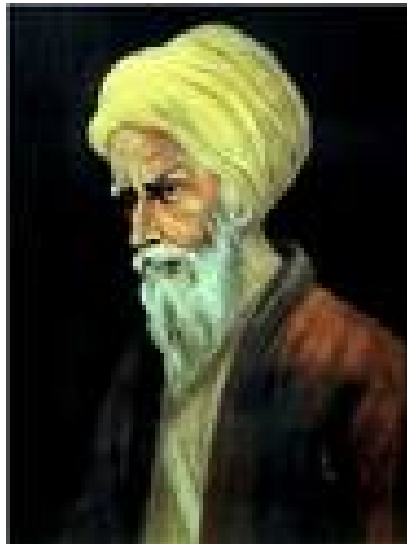
- Entre otras deficiencias, la teoría de los "*eidola*" es incapaz de explicar que un círculo horizontal se vea como una recta.
- El cono visual debe ser continuo pues de otro modo los objetos se verían punteados. Los rayos centrales de este cono son más fuertes y más sensibles, lo que explica la mayor agudeza visual de la zona central del ojo.
- Los rayos visuales, al salir del objeto, transforman el medio, y lo que resulta del cambio recorre grandes distancias hasta reconocer los objetos. (En este argumento recoge las ideas de Galeno).
- Repite el argumento de Aristóteles. La gente con vista débil ve su propia imagen delante de ellos porque sus rayos, incapaces de atravesar el aire, regresan hacia los ojos.

- Repite el argumento de Théon: La estructura del órgano condiciona su modo de funcionamiento.

...Dios hizo los ojos esféricos y móviles. Por ello recoge impresiones a través de su movilidad y selecciona el objeto hacia el que lanzar los rayos. Mientras los oídos (pasivos) reciben, el ojo es móvil para seleccionar el objeto al que enviar señales.

- Así explica la selectividad de la mirada pues de otro modo todas las imágenes serían vistas simultáneamente
- Otro argumento es que al leer un libro tardamos un tiempo en reconocer una letra. Además, los objetos situados al lado del campo visual o lejos del observador son vistos pobremente. Si la visión ocurriera a través de una impresión hecha por la forma del objeto visible en el ojo, cada cosa sería vista simultáneamente, pues todas serían igualmente presentes en el ojo.
- Refuta los “eidola” de los colores aduciendo que una piedra coloreada perdería su color al cabo del tiempo. Más bien sucede que ésta altera el medio y lo colorea igual que él mismo.

Su impacto en el mundo árabe fue grande. Sin embargo, en Europa se redujo a Roger Bacon y John Peckan que se apoyaron en él para defender una teoría combinada.



Alhazen (Ibn Al-Haytham (965- 1040)

La aparición de Ibn al Haythan (Al Haytham, 1989), cuyo nombre latinizado con el que se le conoce en Occidente es Alhazen, derivado del árabe Al Hassan, es el fenómeno más destacable de toda la ciencia árabe. Interesado en teología, medicina, fisiología, filosofía, física, astronomía y matemáticas. Con él llega una nueva manera de entender la Ciencia: Mientras su contemporáneo Avicena intentaba asentar sus teorías peripatéticas con una serie de refutaciones a todas las

hipótesis contrarias, Alhazen establece sus teorías sobre la base de evidencias experimentales con espejos planos y curvos, cámara oscura, etc. (Sabra, 1989)

Su autobiografía sólo incluye sus trabajos científicos. Sabemos que nace en Basora, Irak. De joven viaja a Egipto intentar construir una presa que regule las aguas del Nilo pero la empresa le asusta y para escapar a las represalias del califa, se hace pasar por loco, quedando recluido en una mezquita hasta que éste muere. Hasta el fin de sus días se sostuvo traduciendo en la Universidad del Cairo ¿una copia cada año? de la '*Óptica*' de Ptolomeo.

Es difícil encontrar una figura más prolífica en la producción de la ciencia antigua: especula con la naturaleza física de la luz, la refracción atmosférica, el aumento aparente del tamaño de sol y la luna en el horizonte, hace experimentos de dispersión de la luz en sus colores, investiga sobre el arcoiris, las sombras, los eclipses, focos de lentes, espejos esféricos y parabólicos, aberración esférica, describe las partes del ojo y propone un mecanismo de la visión. A las componentes matemáticas y físicas de sus predecesores, añade la fisiológica y la psicológica. De él hemos heredado por ejemplo, las palabras retina, córnea, humor acuoso, humor vítreo.

Su texto principal titulado '*Kitab al Manazir*' en árabe, se traduce al latín, probablemente en Toledo en 1170 como '*De Aspectibus*', '*Optica*' o '*Perspectiva*'. Sus manuscritos, reproducidos varias veces, fueron la referencia de toda la Óptica europea durante cuatro siglos. Más tarde, Frederick Risner la reedita en Basilea en 1572 en una versión de imprenta junto con la '*Optica*' de Witelo, también llamada '*Perspectiva*', que es publicado con el título '*Opticae Thesaurus, Alhazen libri vii*' (Al Hazen, 1972) y resulta ser la pieza esencial en los avances de Kepler en el siglo XVII. La traducción directa del árabe al inglés la escribió recientemente A. Sabra (1989).

En su texto, supera los viejos tópicos conciliando las teorías de Euclides, de las que preserva su útil aparato matemático, las aportaciones fisiológicas de Galeno que le ayudan a situar la imagen en el cristalino, y la intromisión de las "*eidola*" de Epicuro o las "*formas*" de Aristóteles, que sustituye por imágenes en las que hay una correspondencia de punto del objeto a punto de la imagen.

A pesar de la prohibición musulmana de diseccionar cadáveres, su conocimiento de la anatomía ocular del quiasma óptico le permitió nombrar y dibujar la fisiología ocular. Es esta perspectiva médica con su acercamiento a la experimentación, la que le permite superar el "impass" de las teorías griegas.

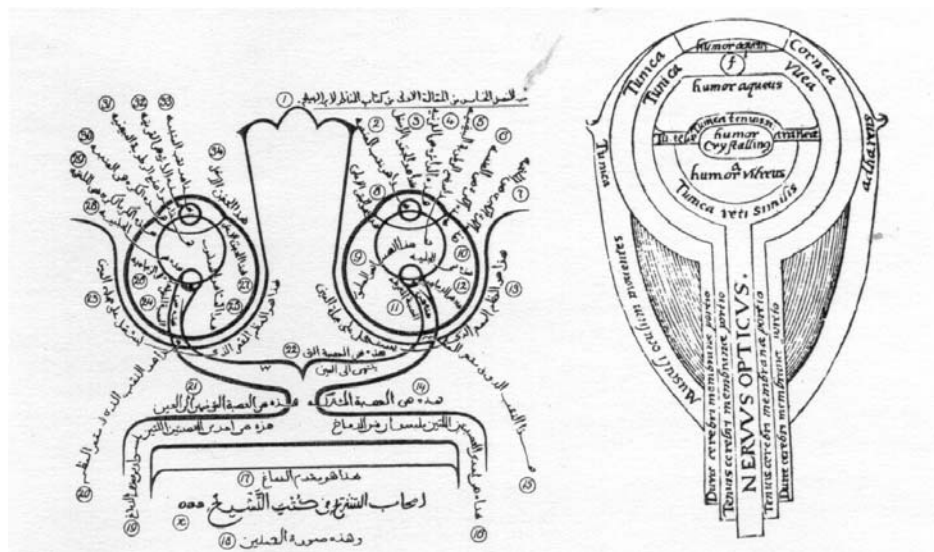


fig . 1..5 Modelos del ojo de Alhazen

Fijémonos que ya describe los órganos internos del ojo e incluso analiza la visión binocular.

¿Extromisión o intromisión?

Alhazen rompe el debate, entre ambas teorías, cuando dice que si miramos al sol, éste nos deslumbra, luego es el objeto el que lanza efluvios a los ojos.

...Encontramos que cuando el ojo miran a una luz muy brillante, sufre grandemente por ello y es dañado. Pues cuando un observador mira al cuerpo del sol, no puede verlo bien ya que su ojo sufre molestias debido a la luz. Igualmente, cuando mira a un espejo pulido irradiado por la luz del sol sus ojos son molestados por la luz que les llega del espejo, y es incapaz de abrirlos para encontrarla. A. I. Sabra. Cap. IV apdo[1]

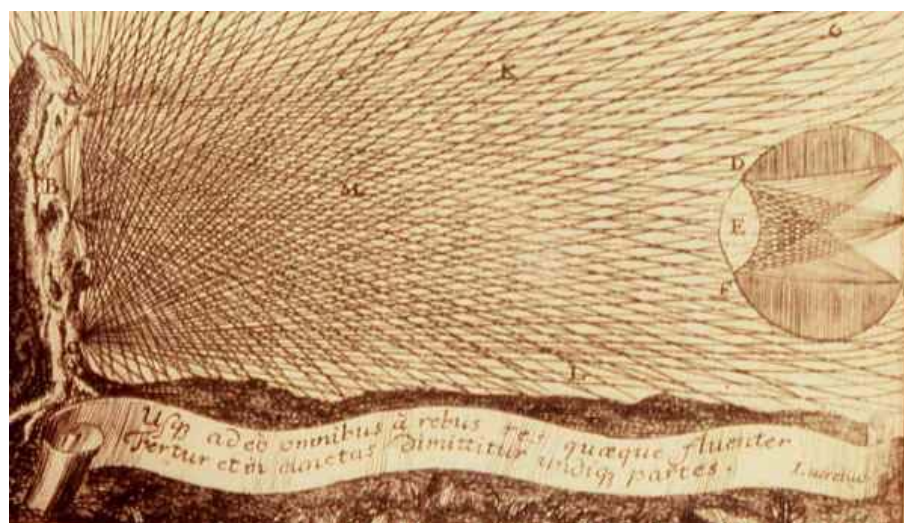


fig. 1.6 Modelo Intromisivo de Alhazen

Este razonamiento es para cuerpos autoluminosos, pero lo amplía a cualquier objeto visible que se verá bajo la emisión de su propia luz , aunque la iluminación previa por un cuerpo auto-luminoso sea requisito normal.

...Se ha demostrado antes que la luz sale en todas direcciones opuestas a un objeto iluminado por cualquier luz. Por tanto cuando el ojo está opuesto a un objeto visible y el objeto está iluminado con luz de cualquier clase, la luz va a la superficie del ojo desde la luz del objeto visible. (Sección 14, p. 7)

...Además encontramos que cuando un observador mira largo rato a un verde y lujurioso prado por la luz del sol, gira sus ojos hacia una plaza oscura, encuentra en esta plaza la forma de esa luz coloreada con el verde de la vegetación sombra. Entonces si mira en ese momento algún objeto blanco en una plaza oscurecida, encontrará sus colores cubiertos con verde.

El fenómeno de las postimágenes refuerza la misma posición :

... Una luz brillante permite permanecer en esta visión por largo tiempo, si él entonces transmite su mirada a una plaza débilmente iluminada el verá la misma cosa. Finalmente ella se desvanece y la visión vuelve a su posición natural.

Encontramos también que cuando un observador mira por algún tiempo a un cuerpo blanco irradiado por la luz del sol, después gira sus ojos desde él hasta una habitación oscura o débilmente iluminada, puede difícilmente obtener una verdadera percepción del objeto del objeto visible en esta plaza, como si hubiera una pantalla entre él y el objeto.

Mientras (el efecto) gradualmente se desvanece, la vista volverá a su propia condición. Similarmente cuando el observador mira a un fuego fuerte durante cierto tiempo, gira sus ojos a una plaza oscura o débilmente iluminada, también experimentará la misma cosa en su vista. [2.]

Al final concluye:

...todas estas cosas indican que la luz produce algún efecto en el ojo.

Para mostrar que el rayo visual no tiene sentido físico ya que en la Naturaleza nada es superfluo y ésta trabaja con economía de medios:

Ahora que hemos visto esto, queda para nosotros exponer la opinión de aquellos que mantienen la doctrina del rayo y muestra qué es sensato y qué no lo es en ella. Decimos: si la visión sólo ocurre a través de algo que sale hacia delante desde el ojo hacia el objeto visible, entonces ello es un cuerpo o no.

Si lo es, cuando miramos hacia el cielo, vemos las estrellas en él y las discernimos y las contemplamos, entonces saldrá de nuestros ojos en ese momento un cuerpo que llenará el espacio entre el cielo y la tierra sin que el ojo pierda nada de sí mismo. Pero esto es bastante imposible y bastante absurdo. La visión por tanto no funciona por medio de un cuerpo que sale fuera del ojo.

Si, de otro lado, lo que sale del ojo no es un cuerpo, no sentirá el objeto visible, porque las sensaciones sólo pertenecen a los cuerpos animados. Por tanto: nada sale del ojo que sienta el objeto visible.[56]

Ahora es evidente que la visión sucede a través del ojo. Si es así y si el ojo percibe el objeto visible sólo a través de algo que sale de él hacia el objeto, y si esta entidad no puede sentir el objeto, entonces lo que sale del ojo no puede sentir el objeto sin dirigir hacia el ojo algo del objeto a través del cual, el objeto es percibido por el ojo. Ahora la razón que lleva a esos que mantienen la doctrina del rayo a mantener su doctrina es que ellos encuentran que el ojo percibe el objeto visible cuando un intervalo existe entre ellos. Y fue generalmente reconocido que la sensación sólo ocurría a través del tacto. Por ello ellos también pensaron que la visión ocurría a través de algo que emanaba del ojo hacia el objeto visible y por ello esta entidad puede o bien sentir el objeto en su propia plaza o tomar algo del objeto hacia atrás hacia el ojo donde es sentido.[57]

Pero si no es posible que un cuerpo pueda salir del ojo y sentir el objeto visible; y si nada más siente el objeto más que un cuerpo animado, sólo queda la conjetura de que lo que sale desde el objeto hacia el ojo reciba del último algo que salga hacia el ojo. Y puesto que hemos visto que el aire y los cuerpos transparentes reciben la forma del objeto visible y la llevan al ojo y a cada cuerpo opuesto al ojo, entonces lo que se piensa que lleva hacia el ojo algo del objeto visible es el aire y los cuerpos transparentes entre el ojo y el objeto. Pero si el aire y los cuerpos transparentes dirigen hacia el ojo algo del objeto visible en todo momento (siempre que el ojo esté frente) sin necesidad de que algo salga del ojo, entonces la razón que lleva a aquellos que sostienen la doctrina del rayo para mantener su doctrina deja de existir. Pues ellos fueron llevados a enunciar esta doctrina por su creencia de que la visión es afectada sólo a través de algo que se extiende entre el ojo y el objeto con el propósito de llevar algo desde el objeto hasta el ojo. Pero si el aire y los cuerpos transparentes colocados entre el ojo y el objeto llevan hacia el ojo algo sin la necesidad de que algo salga fuera del ojo; y, además,...la necesidad de afirmar la existencia de algo más a través de lo cual algo es enviado hacia el ojo, ya no existe, y no existe una razón para ellos decir que una entidad conjetural lleva hacia el ojo algo desde el objeto. Y si no queda razón para mantener la doctrina del rayo, entonces esta doctrina queda invalidada.

La correspondencia punto a punto:

La teoría de Euclides, que explica de modo satisfactorio el hecho de que los objetos se vean de distinto tamaño en función de su distancia al observador, la sigue manteniendo con un pequeño cambio a costa de un extraordinario cambio conceptual: existe el cono pero está compuesto por rayos de luz que vienen del objeto. Tiene la idea genial de elementalizar el objeto, descomponiéndolo en infinitos puntos que, a su vez, emiten infinitos rayos en todas direcciones. Conocedor de que la córnea refractaba la infinidad de rayos que salen de un único punto del objeto, sería imposible una imagen nítida de cualquier objeto pues a cualquier punto del ojo llegarían infinidad de rayos procedentes de todos los puntos del objeto. ¿Cómo salvar la contradicción? Afirmando gratuitamente que sólo los rayos que llegan perpendicularmente al cristalino y la córnea son responsables de la visión, siendo despreciable la intensidad de la luz del resto de rayos refractados. Con ello se consigue la correspondencia punto a punto que sucedería en el cristalino, supuesto ser una pantalla y no una lente.

Pero esta teoría tenía otro punto débil: la infinidad de rayos del objeto entraban a través de una pequeñísima pupila: ¿cómo es que al cruzarse no interferían entre sí? El genio de Alhazen propone, ahora con éxito, asimilar el funcionamiento del ojo al de una cámara oscura con la que experimenta por primera vez en la Historia para ilustrar su teoría. La construye con un tabique provisto de un agujero que proyecta la luz de varias velas a una pantalla situada en la pared opuesta a través de una sala oscura, obteniéndose las imágenes separadas e independientes, lo que demuestra que aunque los rayos se crucen en un mismo punto, no interfieren entre sí una vez que se separan. Extrapolando este resultado al interior del ojo, ya era inteligible que los puntos integrantes de la imagen total en el ojo, estuvieran totalmente definidos.

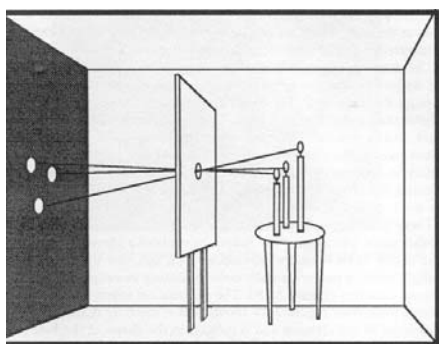


fig.1.7 La cámara oscura de Alhazen (Park, 1997)

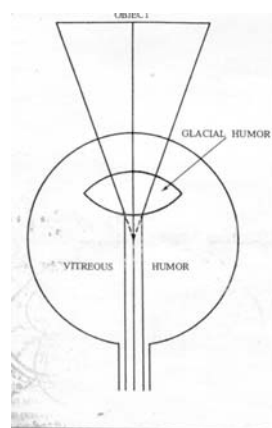


fig. 1.8 Percepción del cono visual (Park, 1997)

A partir de ese momento, Alhazen estaba sólo a un paso de establecer que los rayos, al llegar al cristalino y ser refractados a su través, podrían formar imagen invertida del objeto en la retina, pero ello suponía una contradicción con la evidencia de las observaciones directas. Su afán de coherencia le hace decidir entonces que la imagen se formaría en el cristalino, a modo de pantalla que llevaría la información visual en rayos salen paralelos hasta el nervio óptico y el cerebro. Tampoco se detiene en este punto porque al constatar que como cada ojo da una imagen distinta, es necesario el “*ultimum setiens*” las reunifique.

Establece en su ‘*Óptica*’, que la luz de la Luna procede del Sol. La luz sería un fenómeno que iría a parar al objeto, el cual la devolvería en todas direcciones y en especial hacia el ojo.

¿Qué es la luz? ¿Qué propiedades tiene?

El siguiente párrafo es el más ambiguo de su obra, pues parece reivindicar, también, la existencia de la radiación visual. Un análisis a la luz de los historiadores de la ciencia, lo considera más un

relato de las teorías de Euclides que su propio pensamiento, que se expresa de modo contrario en varias ocasiones.

...La luz en un cuerpo autoluminoso es una de las propiedades que constituye la esencia del cuerpo es una forma sustancial de ese cuerpo y la luz accidental que aparece en los cuerpos opacos los cuales irradian sobre otros de forma accidental, es una forma accidental. En cuanto a los matemáticos, ellos consideran que la luz que emana de los cuerpos autoluminosos es calor ardiente que existe en dicho cuerpo. Puesto que encuentran que cuando la luz del sol es reflejada por un espejo cóncavo y se concentra en un punto en el que se pone un cuerpo combustible, dicho cuerpo arderá. Encuentran también que cuando el aire es irradiado por el sol, este aire se calienta y cuando la luz del sol brilla sobre un cuerpo opaco sobre el cual permanece por un tiempo, el cuerpo se calienta sensiblemente. Por lo tanto ellos son de la opinión de que todas las luces son del mismo género, que todas son calor ardiente, y que sólo varían en su intensidad y debilidad, por ello algunas causan combustión y otras no, según que sean fuertes o débiles.

...“Rayo” es el nombre de la luz que se extiende según líneas rectas en los cuerpos transparentes...Esas líneas rectas según las cuales transcurre la luz son imaginarias y no sensibles, y la totalidad de las líneas imaginarias unidas se llama “rayo “. El rayo por tanto es una forma sustancial que se extiende en línea recta.

...Los antiguos matemáticos sostienen que la visión se forma a través de un rayo que sale del ojo hacia el objeto visible. Este rayo es una energía luminosa del mismo tipo que la luz. Que esa energía es la energía visual y sale desde el ojo en líneas rectas que se originan en el centro del ojo, y que cuando esta energía visual alcanza el objeto, éste lo percibe. En cuanto a los que sostienen que el objeto se percibe por medio de una forma que sale desde el objeto visible hasta el ojo, son de la opinión de que el rayo es la luz que emerge del objeto a lo largo de líneas rectas que se encuentran en el centro del ojo. Para ellos, cada punto del objeto sale luz en línea recta que pueda salir de él. Por tanto cuando el ojo se enfrenta a un objeto visible en el que existe alguna luz, ya sea esencial o accidental, desde cada punto de luz se extiende luz en línea recta desde cada punto que puede extenderla entre el objeto y el centro del ojo en una infinidad de trayectorias rectas. Pero la línea imaginaria entre el centro del ojo y los puntos del objeto está entre las líneas en las que se propaga la luz. El ojo por tanto, percibe la forma del objeto de la luz que lo alcanza sólo a través de ésta línea solamente. Para los que sostienen la opinión de que el ojo está naturalmente dispuesto para percibir sólo este tipo de luz a lo largo de estas líneas..., y llaman “rayo” a la luz que sale en línea recta y se encuentra en el centro del ojo.

...Por tanto, los rayos visuales de acuerdo con todos los matemáticos, es una cierta luz que sale en líneas rectas y se encuentra en el centro del ojo. Y esas líneas son líneas imaginarias a las que los matemáticos llaman líneas de rayo. Y o la luz del fuego o sea la mirada. Esta es la definición de rayo, pero los defensores de la ciencia física no tienen una doctrina precisa del rayo.

En sus trabajos sobre refracción, se acerca sólo de modo cualitativo a la ley de Snell, haciendo medidas de ángulo incidente y refractado, pero no es capaz de hacer intervenir el seno de los ángulos. Afirma que la luz viaja en línea recta, se refleja en los espejos y se refracta en los medios transparentes. Es el primero en explicar el aparente aumento de tamaño cuando el sol está próximo al horizonte. Da el valor de 19° de inclinación para el sol cuando está por debajo del horizonte. Justifica ya la refracción como una consecuencia del cambio de velocidad de la luz en medios

distintos. Discute la densidad de la atmósfera y la relaciona con la altura, la que estima en 15 Km. También investiga con las lentes, conocidas desde la Antigüedad pero debido a sus irregularidades y deficiencias en la formación de imágenes, no las utiliza para ayudar en la visión.

Los espejos planos, esféricos y parabólicos, contruídos en bronce ya son mencionados por Alhazen. Se refiere a ellos cuando enuncia su famosísimo problema de buscar el punto sobre un espejo esférico en el que se devuelve el rayo (o rayos) emitido por un objeto puntual A hacia un observador, cuestión que Huygens retoma con éxito 700 años después.

Aparte su evidente genio, sus logros son debidos en gran medida a su inmensa curiosidad que le hace tocar todas las ramas del saber de su época y al énfasis que hace de la experiencia, mientras que su contemporáneo Avicena (discípulo de Aristóteles) intenta asentar sus teorías peripatéticas por una serie de refutaciones a todas las hipótesis contrarias. Desgraciadamente no se dieron las condiciones sociales para el cambio de paradigma y su obra no formó escuela entre sus contemporáneos. Sólo cuando su obra llega a Europa como *'De Aspectibus'*, o *'Perspectiva'* consigue de la mano de, Witelo (1230-1275), forma la escuela *Perspectivista* que marca toda la evolución medieval de la óptica



5.3 La Óptica en la Edad Media

Tras la invasión bárbara, Europa entra en la Alta Edad Media (siglos V- XI) en lo que se considera el período más oscuro de su historia. La cultura occidental se refugia en los monasterios, mientras que la sociedad civil se desentiende de estos temas. Hay un tímido intento de resucitar las artes y las ciencias en el reinado de Carlomagno, que invita a su corte a los religiosos de los monasterios de Irlanda en su intento de fundar “la Ciudad de Dios”, pero esta intención sólo incide débilmente en las esferas nobles de la Corte.

El Imperio Bizantino, a salvo de las invasiones bárbaras, parecía el lugar adecuado para preservar la cultura clásica pero ya hemos hablado de la regresión intelectual de las cortes bizantinas. A esta situación se añade la negativa incidencia de las cruzadas en el imperio. Durante la invasión de Constantinopla por la IV Cruzada en 1204, se arrasa y saquea la ciudad, además de cerrar los escasos intercambios culturales entre ambas comunidades cristianas.

Sin embargo, en la Europa de los siglos XI y XII se pasa por un período de prosperidad: el debilitamiento de los señores feudales a favor del centralismo de los monarcas, el florecimiento de

la agricultura, el comercio y la industria favorecen un considerable incremento demográfico, nuevos agrupamientos gremiales de la población en torno a las ciudades, y la aparición de la burgueses y mercaderes que pasan a pertenecer a las clases dirigentes. Incluso la educación sufre cambios, pues a las escuelas existentes en los claustros monacales se añaden las escuelas ciudadanas, a menudo dependientes de las catedrales (Grant, 1991; Lindberg, 1983).

En el siglo XII se inician las grandes Universidades de Bolonia (1150), París, Oxford, Cambridge, Alcalá de Henares y Salamanca. Esta explosión da las condiciones para que los eruditos de la época se interesen por otras culturas como la bizantina y la árabe.

De otra parte, el uso generalizado de las energías del agua y del viento en molinos y talleres, lleva a una revolución industrial. Con los grandes fuelles movidos por ellas, se consigue altas temperaturas capaces de fundir el hierro para obtener nuevas armas y el vidrio para cristalerías. Las sierras mecánicas movidas por agua se emplean en la sierra de troncos para la construcción de barcos o la fabricación de papel... La aparición de las nuevas tecnologías produce una colaboración mutua con la ciencia desconocida hasta entonces.

Pero además, suceden otros hechos destacados: Sicilia y media España que estaban bajo el dominio de culturas árabes estabilizadas, son las fuentes por las que las obras griegas y árabes traducidas al latín, llegan a Europa. En nuestro país, Alfonso VI conquista pacíficamente Toledo en 1085 y es allí donde se da la convivencia de las tres culturas, expresada en lo que se denominó la Escuela de Traductores, que en realidad no tuvo una sede física pues sus protagonistas trabajaron de modo independiente. Las traducciones de los clásicos movieron a los eruditos de la época a viajar a España para conseguir las obras de Aristóteles, Galeno o Ptolomeo.

El traductor Gerardo de Cremona traduce al latín en España las obras de Aristóteles, Euclides, (Ken'ichi, 1993), Ptolomeo y, para algunos historiadores, incluso la obra de Alhazen (1972) '*Kitab al Manazir*' que se tradujo al latín como '*De Aspectibus*' o '*Perspectiva*', por este traductor en 1170.

Mientras que Platón ya era conocido desde los inicios de la era cristiana, dando lugar a la escuela agustiniana, no así Aristóteles que supuso un revulsivo para la ciencia y filosofía medievales. Su claridad de pensamiento y la coherencia de su sistema, deslumbraron tanto Alberto Magno como Tomás de Aquino que tras su lectura decidieron que es posible compaginar razón y fe, argumentando que la verdad y la religión deben ser complementarias. A partir de esos años la Universidad de París se centra en la obra de Aristóteles y Averroes, mientras que las de Oxford y Cambridge autores con la tradición neoplatónica de San Agustín.

Estas escuelas de pensamiento condicionaron la evolución de la ciencia, como un apéndice más de sus sistemas filosóficos lo que supuso un lastre muy pesado. En lo que atañe a la óptica, sólo destacan escasas figuras, que heredan los errores de las antiguas concepciones. Las referencias de París son Averroes y Aristóteles, que en esta disciplina abocan a una vía muerta, mientras que Oxford y otros recogen el testigo de Alhazen formando la escuela de los Perspectivistas. Tras ellos se produce un largo paréntesis o de de cuatro siglos hasta la llegada de Kepler.

Roberto Grosseteste (1168-1253)

“*Chancellor*” de la Universidad de Oxford en 1215 hasta 1221, es nombrado obispo de Lincoln en 1235. Estudiante de los griegos y los árabes, conoce las obras de Platón, Aristóteles, Euclides y Avicena, pero no las de Alhazen ni Ptolomeo .

Su obra científica viene enmarcada por el pensamiento del neoplatónico de Plotinus y San Agustín, que defendían *la multiplicidad de las especies*. Según ella, todos los cuerpos (animados o no) irradian espontáneamente una especie de energía responsable de imágenes sucesivas (Grosseteste, 1912), que interaccionan a su vez con las *especies* emitidas por el observador :

*...Cada agente natural propaga su energía hacia los cuerpos circundantes y este poder se llama sentido del tacto y a un cuerpo frío..... Esta energía a veces se llama **especies**, porque los efectos mantienen semejanza con el agente. Los cuerpos calientes, por ejemplo, irradian especies que producen calor en el recipiente, y los cuerpos brillantes emanan especies que producen brillo en los ojos del espectador.*

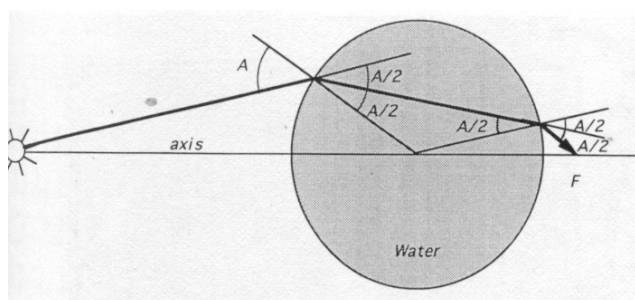


fig . 1.9. La refracción en un dibujo de Grosseteste

Dedica un énfasis especial al estudio de la óptica, pues para él, la luz es la primera de las formas incorpóreas.

Aplica métodos experimentales para verificar las teorías, pues sabemos que trabajó con espejos y lentes, examinó colores y refracción en prismas y globos con agua. En ‘*De Natura Locorum*’ se muestra un diagrama en el que la luz es refractada por un matraz esférico lleno de agua y en ‘*De*

Iride et speculo se explica que el arco iris se forma como consecuencia de dos refracciones, la primera en el límite de la parte más densa con la menos densa de la llovizna.

Aunque sus aportaciones científicas son escasas, tiene el mérito de ser una figura de transición que inicia el rescate de la Ciencia clásica y transmitir a su discípulo Bacon el interés por la experimentación.

5.4 Los perspectivistas medievales

Adoptan este apodo los intelectuales europeos deudores de la mencionada obra de Alhazen (1972), *De Perspectiva*, en su título medieval, entre los que destacan Bacon, Witelo, Grosseteste, Peckan y Teodorico de Friburgo.

Roger Bacon (1214- 1292),

Fue un Franciscano Inglés alumno de Grosseteste. Estudió artes en Oxford doctorándose en París. Vuelve en 1247 a Oxford y regresa de nuevo a París en 1260. Escribe los textos *De Multiplicationes Specierum*, *De Speculis Comburentis*, *Perspectiva*, *Novum Organum* (2004) y *Opus Maius*.

Conocido por su brillantez en todos los campos del conocimiento que trató, se le conoce como el “*Doctor Mirabilis*”.



Aunque sus aportaciones científicas son escasas, se considera el padre de la ciencia moderna por el nuevo énfasis que da a la experiencia (“*scientia experimentalis*”) como herramienta en el conocimiento de la realidad. Se le considera el profeta de la ciencia moderna y tecnología (predice el telescopio, el automóvil, el aeroplano,...) . Sus críticas a los eruditos Alberto Magno y Tomás de Aquino, a las formas de enseñar la ciencia, su afición a la Alquimia y la brujería, provocaron su encarcelamiento hasta casi el final de sus días.

Conocedor de Alhazen, al que descubre en 1260. Integra con Witelo y Peckan y Teodorico de Friburgo el grupo de los perspectivistas. Habla ya de la pirámide visual. Apoya la tesis de Alhazen de que sólo los rayos perpendiculares al ojo impresionan el cristalino, porque recorren el camino más corto.

Sin embargo en su intento de conciliar todas las teorías, reivindica como Grosseteste la teoría de la *multiplicidad de las especies* de los neoplatónicos. Habría para él, *especies* (retratos de formas corporales) que salen desde el ojo y de los objetos (estas especies no tienen naturaleza corpórea) .

A pesar de que se asocian sus especies con las "eidola" de los atomistas, alegando una incapacidad de comprender las nuevas teorías, no es cierto, pues ya explicita que *el sol expulsa especies, no materia, pues de ser así, se habría agotado en tanto tiempo de existencia*. Como en sus compañeros Grosseteste y Peckan, inmersos en la influencia platónica, estas especies se entienden como una energía no material que irradia de los objetos.

...Pues cada causa eficiente actúa a través de su propio poder, el cual actúa en su materia adyacente, como la luz del sol ejerce su poder en el aire (Opus Majus IV, dis . 2)

..Las especies de las cosas del mundo no están acompañadas de sí mismas para llevar la culminación de la acción sobre el ojo, a causa de la nobleza de este último. Por tanto las especies deben ser asistidas y excitadas por las especies del ojo, el cual procede a través de la pirámide visual, alterando y ennobleciendo el medio, haciéndole compatible con la mirada. Entonces, las especies del ojo se preparan para el acercamiento de las especies del objeto visible y, además, ennoblecen las especies del objeto de modo que se hace del todo compatible con la nobleza del cuerpo animado. (Opus Majus, V, Dist. 7, Ch 4, Bridges Vol II p. 52)

Tanto Bacon como Beckan defienden la *multiplicación de las especies* de Grosseteste que emanan de todos los objetos. Igual que las *formas* de Alhazen son energías, no átomos ni corpúsculos. Tienen las mismas propiedades que las *formas* de Alhazen.

Hay una diferencia sutil entre ambos conceptos: mientras que la especie de un objeto en la tradición platónica son un todo coherente, las formas de Alhazen son multipuntuales. La novedad de Bacon es añadir que esta especie es susceptible de un análisis puntual, con lo que salva la contradicción. Endosan a las especies las propiedades ópticas de las *formas*.

Sus aportaciones a la óptica sólo son escasas. Comprueba que el arco iris no se forma cuando el sol está a más de 42° por encima del horizonte. Rechaza explicar que sea la refracción la responsable del arco iris porque viaja con nosotros al movernos y por tanto debe ser debido a la reflexión de la luz en las gotas de agua en las nubes. Como su maestro, experimenta la reflexión y refracción de la luz en globos llenos de agua. En su '*Opus Majus*' cuenta las posibilidades de aumento de las lentes, estudia las lentes convexas y las propone para estudiar defectos visuales aunque no da aplicación a esta idea. Sin embargo las primeras gafas son inventadas por Alexandro della Spina, un monje de Pisa y Salvino deli Armati en Florencia, sede de una próspera artesanía del vidrio, entre 1285 y 1299.

En la polémica entre colores reales y aparentes, considera que tanto los del prisma como los del cuello de paloma son reales y no aparentes. Conoce la pólvora y la combinación de lentes.



Witelo (1230/35- 1275/80)

Nace en Silesia (Polonia). Aunque no se conoce casi nada de su vida privada, sabemos que estudió artes en París, viajó a Italia para estudiar legislación canónica y en Viterbo tuvo acceso a los trabajos de Bacon que estaban en poder de la Curia. Se dice que su interés por la óptica nace tras la contemplación del arcoiris en una cascada. Es el erudito medieval que interpreta más fielmente a Alhazen. De nombre latino Witelliun, su libro '*Perspectivorum libri*' (Witello, 1270), en una clara emulación a la obra del maestro, fue la referencia de la Óptica en las Universidades Europeas durante cuatro siglos. Su texto se imprime junto con la *Óptica* de Alhazen por Friedrich Reiner en 1572.

De su obra destaca la construcción de espejos esféricos y la invención de un sencillo aparato para la medida de ángulos de refracción, que siglos más tarde utilizará Descartes en la demostración de su ley compartida con Snell. Su lenguaje es más matemático que el de su maestro, al que nunca cita, aunque no añade ideas físicas nuevas.

John Peckan (1240-1292)

Arzobispo de Canterbury. Su libro '*Perspectiva Communis*' (Peckan, 1970) se reimprime doce veces en el siglo XVII para uso en las universidades medievales.

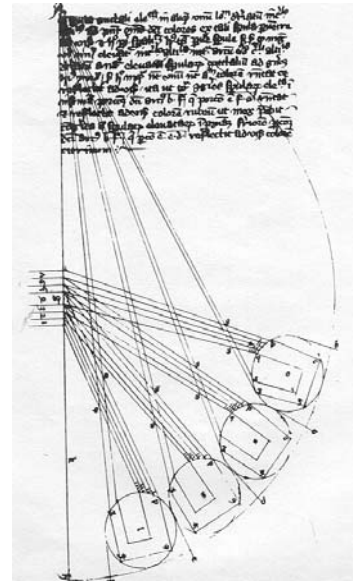
Para él AlHazen sólo demuestra la insuficiencia, no la no existencia de los rayos visuales. Por ello defiende la existencia de especies visuales y especies luminosas.

...Cada cuerpo natural visible o invisible, difunde su energía radiante hacia otros cuerpos. La prueba de esto es por una causa natural, pues un cuerpo natural actúa hacia fuera de sí mismo por una multiplicación de sus formas. Por tanto, cuanto más noble es, más fuerte es su acción. Y cada acción en línea recta es más fácil por naturaleza, cada cuerpo natural, visible o invisible, debe multiplicar sus especies en línea recta; y esto es radiar.

Teodorico (Dietrech) de Friburgo (1250-1310)

En su obra '*De iride et radiabilis impresionibus*' fechada entre 1304 y 1311 (Dietrich, 1959) escribe sobre el arco-iris primario y secundario de los que hace un diagrama bastante acertado. Es contemporáneo del árabe Kamal al Dir que llega prácticamente a sus mismos avances. Es lógico que así sucediera puesto que ambos trabajaban con las obras de Aristóteles y Alhazen.

fig . 1.10 El arco iris de Teodorico de Friburgo



Gregorio Reich

Prior del monasterio cartujano de Friburgo .La baja Edad Media da retroceso considerable como demuestra el éxito de Gregorio Reisch autor de la '*Margarita Philosophica*'. Es una enciclopedia de todas las ramas del saber en forma de diálogos. Reimpresa 14 veces entre 1486 y 1583. No menciona a Alhazen ni Bacon *pero sí* las "*simulacra*" de Lucrecio. Podemos clasificarlo como un representante de la regresión científica que siguieron a los perspectivistas.



5.5 El Quattrocento italiano

En el siglo XIII, los perspectivistas europeos habían recuperado el camino correcto hacia la interpretación de la visión, debido en gran parte a la aportación árabe que supuso un avance significativo tanto de los conceptos incorporados como de la metodología de abordar experimentalmente el estudio de los problemas. Sin embargo sus fuentes sobre la anatomía del ojo datan de los tiempos de Galeno debido a que la religión árabe prohibía la disección de animales. Unida dicha prohibición a la pesada carga escolástica dieron lugar al estancamiento del que no eran capaces de salir: los rayos saldrían de cada punto del objeto hasta la córnea pero sólo el que incidía normalmente era eficaz para formar imagen en el cristalino. Conocedores del fenómeno de la refracción, quedaban las incógnitas de qué sucedía con los demás rayos no perpendiculares y de la función de la retina. En su terror de admitir la inversión de la imagen, deciden que el cristalino es la pantalla y no una lente, y que los rayos no normales se debilitan grandemente sin causar impresión.



fig .1.11 Inicios de la Perspectiva en Giotto

Afortunadamente, a partir del siglo XIV el desarrollo de la pintura y los avances en el conocimiento de la anatomía ocular, dan lugar a tres hechos relevantes: la invención de la perspectiva lineal, el mejor conocimiento de la cámara oscura y las lentes, así como la identificación de la retina como extensión del nervio óptico y pantalla en la que se recogía la imagen real.

La valoración de lo que estos hechos supusieron difiere bastante en algunos historiadores de la ciencia pues mientras que para Vasco Ronchi (1956), los siglos XIII, XIV, XV y XVI supusieron el arrinconamiento de las teorías de Alhazen, David C. Lindberg en *'From Al Kindi to Kepler'* sostiene que los eruditos de estos siglos nunca olvidaron al menos la construcción del cono visual con vértice en el centro del ojo, que explicaba la diferente percepción de distancias y volúmenes de los objetos. Muchos pintores sostenían que el dilema entre extromisión e intromisión no aportaba nada a sus trabajos, puesto que la hipótesis del cono extromisivo de Euclides era igualmente válida para sus representaciones, luego preferían obviarlo. Mi opinión es que costa de perder rigor, la nueva apuesta por la eficacia permitió desembarazarse de la pesada herencia escolástica y progresar como nunca se había hecho hasta entonces en las técnicas de representación del espacio en tres dimensiones.

Uno de los precursores de la pintura renacentista, *Giotto di Bondone* (1266-1337), en sus frescos de la capilla Arena en Padua, inicia una nueva forma de relacionar el espacio con su representación

en el plano de una pared o una tela. Añadiendo las tres dimensiones a sus cuadros y humanizando la expresión de sus personajes, se aproxima más a la representación de la naturaleza. A partir de entonces, es posible expresar la profundidad, el punto de vista del observador.

Un siglo más tarde, el arquitecto y escultor florentino Felipe Brunelleschi (1377-1446), autor de la cúpula de la catedral de Florencia, se convierte en el fundador formal de este movimiento. En su meta de conseguir la representación lo más fiel posible del espacio, pinta dos cuadros ya desaparecidos, que marcan una nueva escuela: en uno aparece el baptisterio de la Plaza del Duomo y en otro la Plaza de la Señoría que son un ejercicio de ajuste a los principios de la perspectiva lineal. A partir de entonces, todos los pintores se ajustan a ellos.

A tal extremo llega su celo en la reproducción de la realidad, que según su discípulo Manetti, el cuadro del Baptisterio tenía un pequeño orificio en su centro que permitía al observador contemplar su imagen en un espejo situado en frente de él. Alejándolo o acercándolo con el brazo de los ojos, se conseguía superponer la imagen del cuadro con la escena real. Era efectivamente un método engorroso pero se conseguía reproducir la visión exacta del espectador.

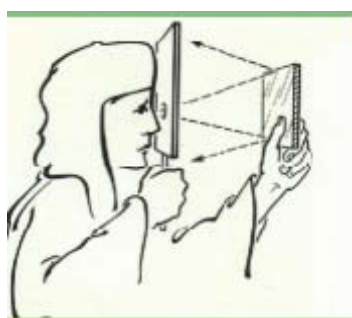


fig . 1.12. Representación en perspectiva del Duomo de Florencia

Manetti, en su texto '*Della Pinta*' escrito en 1435 recoge las ideas matemáticas de su maestro: la clave es el cono visual o la pirámide con base en el objeto y vértice en el centro del ojo a partir de la cual se obtiene el cuadro es una intersección del cono visual con la ventana que representa el cuadro.

Desarrollando esta idea, aparecieron nuevas técnicas de ayuda en la representar el espacio. Una de ellas fue el adaptar un velo semitransparente a un bastidor a través del cual se observa la escena. Ello permitía fijar series de líneas perpendiculares superpuestas a la visión del objeto que hacen de coordenadas con lo que es posible calcar sus contornos de modo trivial. El perfeccionamiento en el pulido de espejos sobre vidrio sustituyendo a los metálicos hizo posible que Giotto y Brunelleschi pintasen observando la imagen del objeto en un espejo que se sitúa frente a éste, en

el que se puede reproducir el procedimiento anterior. Ambas técnicas permiten reproducir la realidad con precisión fotográfica. Otra menos conocida consistía en proyectar la imagen del objeto a través de una lente de gran distancia focal sobre una tela situada en una habitación oscurecida. El artista, en una primera aproximación dibujaba el contorno de la imagen así obtenida. En la mayoría de los casos, este procedimiento daba figuras muy desproporcionadas en tamaño, además de las asimetrías en derecha e izquierda como se observa en multitud de cuadros.

Aunque esta escuela no intentó profundizar en la vieja polémica entre extromisivos e intromisivos, alegando que esta discusión era estéril para sus propósitos, su aportación a la pintura supuso una revolución en la representación de la realidad. El problema de corresponder el espacio tridimensional con su proyección en dos dimensiones que explicase las diferencias de tamaño según la distancia y las deformaciones de las líneas paralelas, quedaba explicado asignando un cono con origen en el espectador del que radiaban líneas a las distintas partes del objeto.

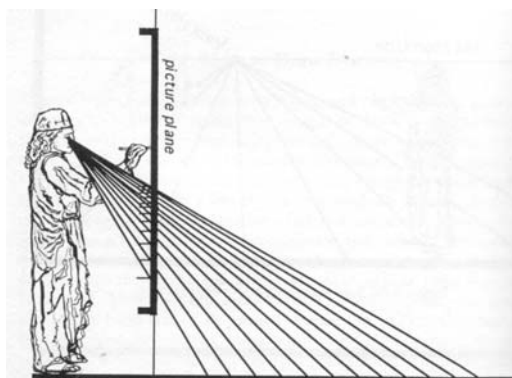


fig . 1.13. El uso por los pintores renacentistas de un velo fue una técnica extendida en el Renacimiento.

A partir de ese momento, esta técnica tiene su plenitud en las figuras Piero della Francesca (1416-1492), Leonardo da Vinci (1452-1519) y Alberto Durero (1471-1528) pero no es nuestro propósito indagar en ella sino en su relación con las teorías de la visión. Lo que sí está demostrado es que aunque de modo superficial, los pintores de la perspectiva lineal indagaron sus fundamentos bebiendo en los perspectivistas medievales. Para los segundos, la pirámide visual era un artificio para entender la visión, mientras que para los pintores sólo resultó ser un instrumento crucial, cuyo cuerpo teórico daba el espaldarazo definitivo a las teorías de Alhazen.

5.6 La óptica en el Renacimiento

Los siglos XIV y XV asistieron a una serie de cambios que modificaron rápidamente la organización y cultura de la sociedad europea. Aunque las universidades continuaban regidas por las tradiciones escolásticas en las que las enseñanzas de Aristóteles eran obligatorias, aparecen varios factores que revolucionan las sociedades de la época: la pérdida de poder de la nobleza a favor de las cortes centrales, el creciente comercio en el Mediterráneo, la invención de la imprenta y la caída de Bizancio en 1454, que muchos textos citan como inicio del Renacimiento, dan lugar a la aparición de una nueva clase social de profesionales no religiosos (arquitectos, talladores de lentes, artistas, cartógrafos) capaces de romper con la rigidez del mundo escolástico y de volver su atención hacia los aspectos más lúdicos y creativos del pensamiento. La caída de Bizancio por otro lado, dio lugar a que multitud de sus eruditos y orfebres emigraran a Italia aportando su tradición griega. Su conocimiento dieron lugar a una desconocida ebullición: se recuperaron textos de Platón, Plotinus, de los filósofos presocráticos, de Pitágoras, de Parménides, ... se resucita la tradición alquimista, se reivindica la estética de los clásicos y la religión adopta imágenes mucho más cercanas al hombre.

Pero esta crisis de los valores antiguos no siempre dio lugar a una adhesión total de los modelos clásicos. Algunos como Leonardo, Miguel Ángel o Galileo, prefieren leer directamente del *libro de la Naturaleza* argumentando que esta vía es más eficaz que la de copiar lo que otros han pensado antes. Como ejemplo de una rebelión radical, se cita que el médico Paracelso (1493-1541) quemara libros de Galeno y Avicena en una plaza pública en Suiza.

En lo que se refiere a la óptica, los pintores del Quattrocento, documentados superficialmente en las tradiciones de Alhazen y Euclides, habían llevado la perspectiva lineal a una precisión fotográfica. En el Renacimiento, esta materia recibió nuevas aportaciones de pintores, anatomistas y ópticos que le permitieron asentarse definitivamente como Ciencia.

Leonardo da Vinci (1452-1519)

Pocas figuras representan como él el prototipo del genio polivalente, poseedor de una energía, curiosidad y talento excepcionales (Friedenthal, 1995), pero sus orígenes humildes y su incapacidad para leer el latín con soltura le impidieron un conocimiento consistente de las aportaciones de los clásicos. Criticado por sus contemporáneos eruditos por su condición de hombre iletrado, respondía con un tono desafiante:

...Ellos (los arrogantes) dirán que por falta de mi erudición no puedo expresar correctamente aquello de lo que quiero tratar . ¿No saben ellos que mis temas requieren para su exposición experiencia más que las palabras de otros? Y puesto que la experiencia ha sido la dueña de todos los que escriben bien , la tomo como mi dueña y es a ella a quien hago mi llamada en todos los puntos.

Esta confesión retrata su voluntad autodidacta que le hizo investigar en matemáticas, óptica, acústica, mecánica, historia natural, anatomía, geografía física, y pintura. Su ignorancia del latín no era total pues tenía un conocimiento de los textos de Blausius de Parma en estática o John Peckan de óptica, todos en latín. Su interés por la óptica, expresado en manuscritos como ‘*Sobre la Luz y la Sombra*’ o ‘*Sobre el Ojo*’, duró toda su vida pero sus conocimientos de la anatomía ocular y sus análisis en temas como la naturaleza de las imágenes son contradictorios y superficiales en ocasiones. (Lindberg, 1986).



fig. 1.14 *La Última Cena* .Fresco de la capilla Santa María delle Grazie .Milán

Su interés por la óptica fue constante toda su vida. Investigó sobre el color, la perspectiva e incluso en la visión. Salvando todos los tópicos, Leonardo nos da un ejemplo de hasta dónde puede llegar en ciencia, un genio que desconoce o trivializa las aportaciones de sus predecesores.

La clave de sus concepciones es su teoría de la radiación y de la pirámide radiante. Según ella los objetos envían sus especies en todas direcciones hacia el medio transparente externo. Estas especies convergen a lo largo de líneas rectas en lo que son los lados de una pirámide con base en el objeto y vértice en cada punto del medio. Así daba respuesta al distinto tamaño de las imágenes en función de su distancia al objeto. De acuerdo con ello, el espacio estaría saturado de especies provenientes de los distintos objetos que se atraviesan mutuamente sin interferir.

...Cada punto de la pupila ve el objeto completo y cada punto del objeto es visto por toda la pupila.

La pregunta inmediata, a la que ya se enfrentó Alhazen era la de si tal cúmulo de imágenes inundando el espacio, no interferirían entre sí. Para responderla, Leonardo reanuda el estudio de la cámara oscura de Alhazen, pero no se queda en la mera comprobación sino que da un salto genial, proponiendo que el ojo tiene un comportamiento similar. A partir de ese momento se inician una serie vertiginosa de trabajos. Aunque Leonardo fue un reconocido anatomista, su conocimiento del ojo fue más incompleto que el de Galeno. De conocer en profundidad a los antiguos, se hubiera adelantado en cien años a Kepler. Básicamente para él, el ojo consistía en dos esferas concéntricas donde se situaban el humor acuoso y el cristalino. El nervio óptico, quizás, se extendía hasta el cristalino donde recogía la información de la imagen.

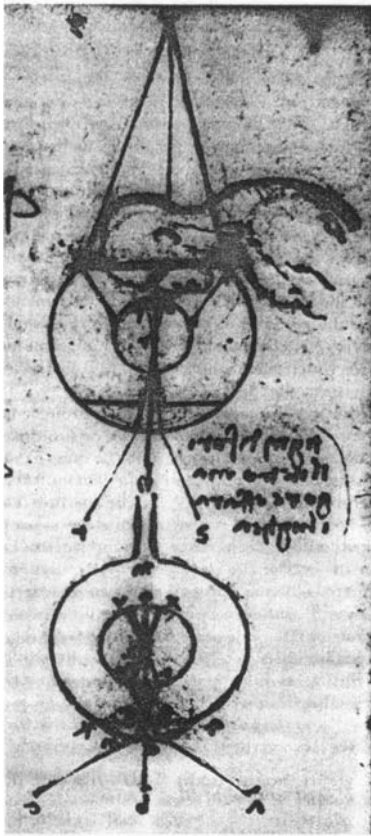


fig .1.15 Modelo de ojo para Leonardo

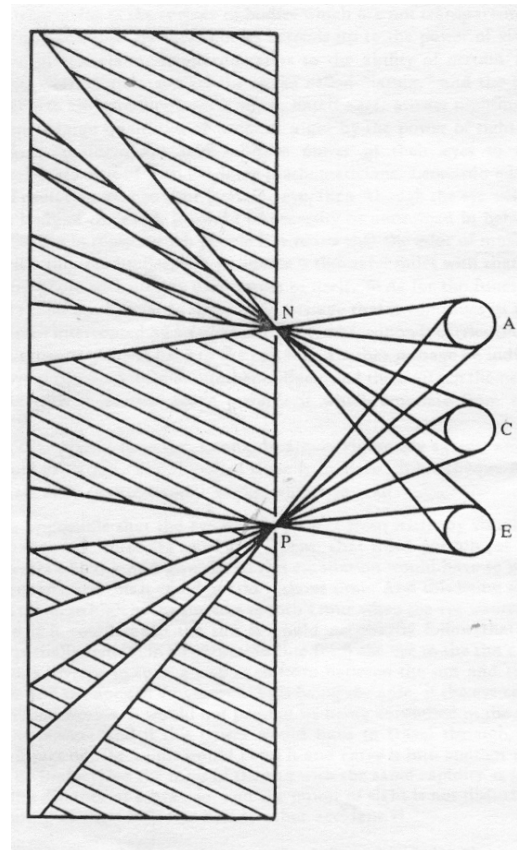


fig. 1.16 Los conos visuales

Para él, el cristalino no es el lugar donde se forma la imagen punto a punto, pues argumenta que si se coloca una pequeña aguja en frente del ojo, se continúan viendo los objetos situados en la visual del observador. En su lugar propone que los rayos prolongados a través del cristalino, inciden en la extremidad del nervio óptico que sería el órgano sensible. La función del cristalino sería la de proporcionar una segunda inversión responsable de que la imagen se viera directa. Para ilustrarlo, realizó la experiencia de la observación a través de dos esferas concéntricas llenas de agua con dos

aberturas que simulaban la pupila y la retina. En el extremo de la más externa se introducía la cara, de modo que los ojos estuvieran sumergidos en agua para observar la imagen incidente a través de la pupila.

En sus pergaminos encontrados en la Biblioteca de Francia, propone distintas soluciones a su modelo del ojo. La última expone que el cristalino pasa a ser un medio refractivo en el que se produce una doble inversión desde donde los rayos llegarían paralelos al nervio óptico. No considera diferencias de densidad en los medios refractivos ni precisa cómo se recogerían estos rayos. Esta falta de rigor aparece también en sus trabajos de mecánica.

A la hora de evaluar las aportaciones de Leonardo al campo de la óptica observamos luces y también sombras: de un lado sus estudios de la cámara oscura, su descubrimiento del tamaño variable de la pupila y la identificación del cristalino como un medio refractivo, fueron contribuciones importantes, pero en sus errores no podemos ser complacientes. Aunque es lector de los textos perspectivistas, no los entiende, su conocimiento de la anatomía ocular es deficiente y lo mismo sucede con la aplicación de la refracción a la formación de imágenes, y sus teorías de la visión son una mezcla imprecisa de las teorías platónicas y perspectivistas.

Lindberg (1986) lo justifica diciendo que no basta un genio aplicando un buen método sobre conocimientos vacíos para resolver un problema. Sin un conocimiento sólido de las aportaciones y críticas de los autores medievales, es lógico que las hipótesis no contrastadas dieran lugar a estos errores. Esta misma desconexión con los eruditos anteriores, sucede con sus aportaciones, pues la mayoría de sus escritos estuvieron desconocidos hasta 1636 y aún entonces ni siquiera se estudiaron seriamente por lo que ni sus errores científicos consiguieron una mínima continuidad. Leonardo no dejó pues, una herencia científica contra algunas creencias simplistas.

5.7 La anatomía ocular

Ya desde la Baja Edad Media, también este campo experimentó un desarrollo espectacular. Contribuyeron a ello los adelantos de Medicina, las traducciones de Galeno, la representación del cuerpo humano en los cuadros de los grandes pintores, y la aparición de la imprenta que permite que las láminas anatómicas sean conocidas por doquier.

Durante el siglo XIV era universalmente aceptado que el globo ocular tenía siete túnicas (córnea, conjuntiva, esclera, la uvea con una apertura, la pupila, la aranea con su continuación posterior, la retina y tres humores (acuoso, vítreo y cristalino)

El belga Andrea Vesalius (1514-1564) profesor de la Universidad de Papua, publica un texto que revoluciona la anatomía de la época: '*De Humani Corporis Fabryica*'. En la descripción del globo ocular añade dos novedades: la aserción de que el nervio óptico es macizo y una descripción más precisa del cuerpo ciliar. Continúa situando el cristalino en el centro del ojo. Expresa dudas sobre la teoría de Galeno. En su libro introduce las innovaciones del cuerpo ciliar o el hecho de que el nervio óptico sea sólido y no hueco. En lo que se refiere al mecanismo de la visión, admite su ignorancia, aunque se cuestiona el papel que del cristalino hace Galeno y ya sugiere que la retina puede tener una función sensitiva. Ya comenta la posibilidad de que el cristalino pudiera ser considerado como una lente.



Tras estos antecedentes, Félix Platter (1536-1614) escribe en 1583 un sencillo volumen de 200 páginas y 50 láminas '*De corporis humani structura et usu...libri III*' donde derroca la influencia de Galeno. Básicamente introduce una mejora en la ubicación del cristalino, más próximo a la córnea que en Vesalio y le atribuye sólo una función refractora. También propone la retina como pantalla de las imágenes. Quizás le indujera a ello el hecho de que algunos pacientes siguieran observando claridad tras suprimirles el cristalino y el hecho de que la unión del cristalino al globo interior, fuera sólo una sencilla membrana en las que no vio inervaciones. Aunque Platter no era capaz de interpretar la geometría de la formación de imágenes ni solucionar el problema de la inversión ni la multiplicidad de rayos, el protagonismo de la retina dejó la puerta abierta a la resolución definitiva del problema de la Visión.

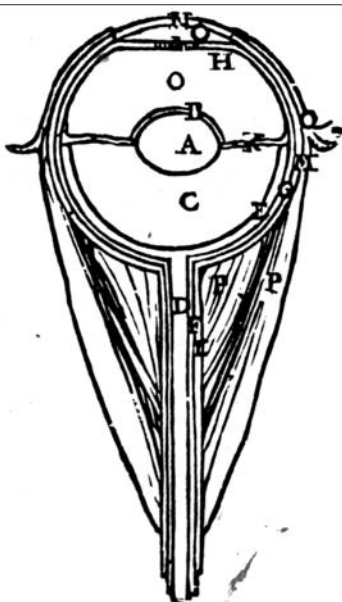


fig .1.17 Globo ocular de Andrea Vesalius

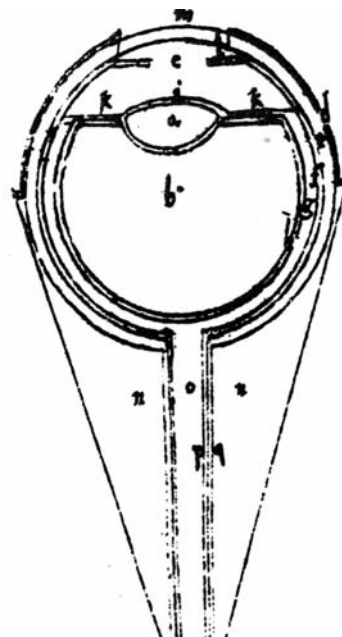


fig .1.18 Globo ocular de Felix Platter

5.8 La nueva óptica

A principios del Renacimiento, la comunidad científica estaba en condiciones de dar el salto definitivo hacia la comprensión de cómo se forma la imagen a su llegada al nervio óptico. La tradición de los perspectivistas, parcialmente arrinconada en las Universidades y pergaminos, tomó un nuevo relevo en las figuras de Francesco Maurolico, Giovanni della Porta y Friederic Risner. Una vez descartado el papel del cristalino como pantalla, cualquiera de ellos pudo dar el siguiente paso, pero le tocó hacerlo al mejor matemático y astrónomo del siglo XVI, Joannes Kepler. El nuevo paradigma científico también afectó también a la Óptica que a partir de entonces se conforma como ciencia subdividida en Óptica Fisiológica, Percepción, Óptica Geométrica y Óptica Física. Las figuras de estos pioneros merecen estudiarse con algún detenimiento.



Francesco Maurolico de Messina (1494-1575)

Hijo de un médico griego huído de la invasión turca de Constantinopla, es probable que conociera allí la obra de Alhazen. Reside casi toda su vida en Sicilia, donde se hace monje benedictino y allí se le encargan trabajos civiles eventuales como la dirección de la Casa de la Moneda de Sicilia o la construcción de las fortificaciones de la isla cuando estaba bajo la autoridad de Carlos V de España. Destaca como profesor de Matemáticas y Astrónomo en la Universidad de Messina. Son conocidas sus traducciones de Euclides, Apolonio y Arquímedes y sus textos de matemáticas y geometría. Conocedor de la refracción en las lentes esféricas y asféricas, describe incluso las aberraciones cromáticas. Es el primero en describir la acción desviadora de los rayos de luz en los prismas

Su obra '*De Óptica*' aparece en el libro '*Photismi de lumine et umbra and Diaphaqaanorum libri*' (1611) en el que retoma los tópicos perspectivistas. Consigue superarlos, pues en su análisis de las gafas que mejoran la visión, tiene un discurso genial:

...si las gafas mejoran la visión y éstas curvan los rayos, el cristalino que también tiene forma de lente, tendrá también una función refractora.

Si los rayos curvados influyen en la visión, la vieja afirmación de que sólo los rayos perpendiculares tenían efecto en la visión, quedaba desautorizada. El rayo central sigue siendo el más fuerte, pero los otros también contribuyen. Para evitar la inversión de la imagen, afirma que la convexidad del cristalino no es pronunciada pues tiene forma lenticular y no esférica, y por ello, antes de converger en el foco, los rayos emergentes de la segunda cara, llegan en un haz hasta el nervio óptico. A pesar de encontrarse en los umbrales de la respuesta definitiva, sigue manteniendo, además, la función del humor cristalino como pantalla.

El humor cristalino puede refractar y transmitir las especies visuales, pero en el proceso las percibe.

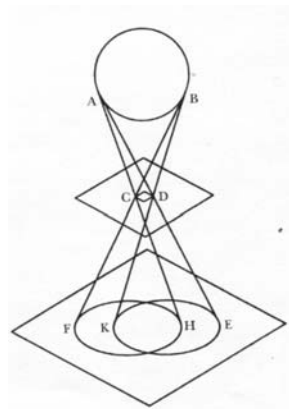


fig.1.19

En él aparece resuelta por primera vez en la historia la paradoja de la radiación de los cuerpos luminosos a través de la cámara oscura. La clave es que cuando la luz procedente de un objeto llega a una rendija se recogen varias imágenes del objeto en una pantalla situada tras la rendija. Si es estrecha, solapan prácticamente superpuestas y la imagen es nítida, pero si la rendija se ensancha, las imágenes se superponen en posiciones más espaciadas con lo que el resultado deja de ser una imagen observable. Sin embargo no es capaz de llevar estas conclusiones a la función visual.

Igual que a Leonardo su aislamiento impidió que sus trabajos se conocieran por la comunidad científica de la época. Su libro lo publicaron sus sobrinos en 1613 para evitar que se plagiasen su obra, una vez que Kepler ya había presentado sus conclusiones.

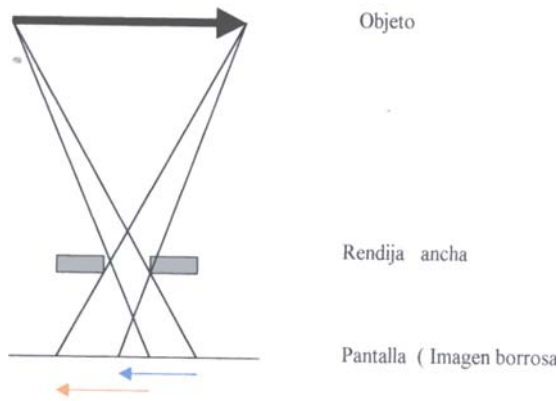


fig.1.20

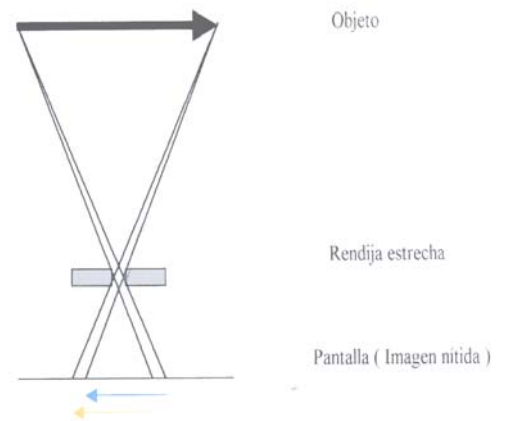


fig. 1.21



Giovanni Battista della Porta (1535-1615)

Hijo de familia noble, su infancia aparece rodeada de todo tipo de gentes de la cultura. A los veintitrés años, en 1558, publica *‘Magia Naturales’* (Porta, 1558), un libro de magia, trucos y curiosidades científicas dirigido a un público no instruido, que recorrería toda Europa en sucesivas ediciones. Tuvo una difusión excepcional pues consiguió veintitrés ediciones en los distintos idiomas de la época. Lo más destacable es el nuevo tratamiento que hace de la cámara oscura, puesto que aunque ya era conocida desde la antigüedad, tiene la ocurrencia de poner una lente convergente en el orificio con lo que consigue una imagen mucho más nítida:

„Te enseñaré un secreto.... con una lente en el agujero se mejora la imagen. Esta experiencia enseña a los filósofos y los ópticos en qué lugar se hace la visión...., El simulacro entra por la pupila, como por la abertura de la cámara oscura, y la lentilla esférica del medio del ojo, hace el papel de pantalla (Ronchi, 1991).

Recordemos que, hasta entonces, los científicos veían las lentes como artificios nada fiables a través de los cuales se observaban imágenes distorsionadas, más propias para mercados populares. El mérito de Porta es el llamar la atención de los científicos al quejarse de que hasta entonces nadie hubiera iniciado su estudio con seriedad, y lo consigue, puesto que en 1590 ya existen referencias de la construcción del primer telescopio en Italia, cinco años antes de la supuesta en Middelburg, Holanda, por Zacharias Jansen.

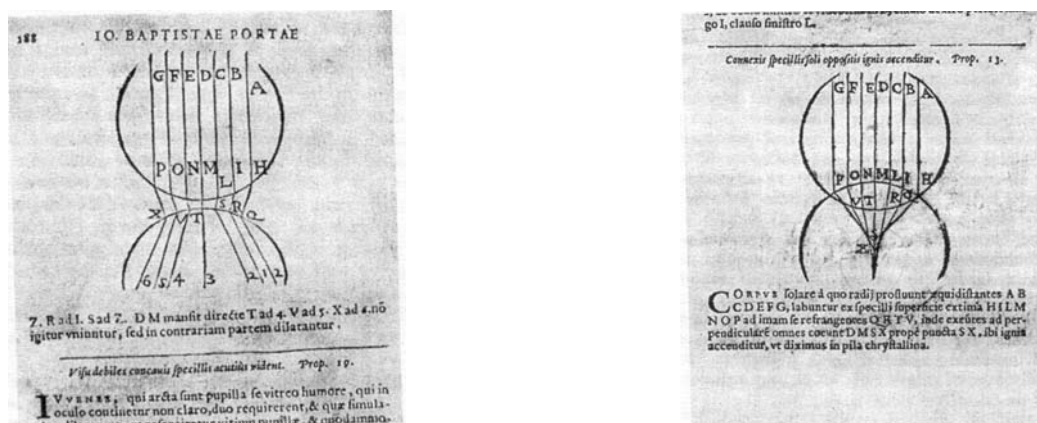


fig .1. 22 Lentes y rayos refractados en la obra de Porta

Él mismo se decide a ello y el capítulo X de su texto ‘*De Cristaline Lentis Effectibus*’ lo consagra a las lentillas. Habla de lentes cóncavas y convexas y su necesidad para la vida humana criticando que nadie las haya analizado.

En otro pasaje del capítulo X dice incluso cómo construir lentes divergentes

... las lentillas cóncavas hacen ver muy claras las cosas lejanas, las convexas las cosas próximas. Por tanto se las puede usar para la comodidad de la visión. Con las cóncavas ves las cosas pequeñas pero claras. Con las convexas, las cosas próximas más grandes pero menos netas. Si las sabes unir adecuadamente, verás mayores y más claras las cosas próximas y las lejanas.

Estas líneas insinúan que Porta había manejado un telescopio, pero miradas en su contexto, parecen ser una más de las frívolas recetas de magia de su libro. Lo que está fuera de duda es que su obra fue el detonante de la consideración seria de las lentes.

En 1593 escribe ‘*De Refractione*’ (Porta, 1589), el primer libro en que se esboza la teoría de las lentes esféricas y de las gafas. En él dibuja de modo correcto la trayectoria de los rayos reflejados y refractados entre dos medios distintos e incluso a través de lentes biconvexas y bicóncavas.

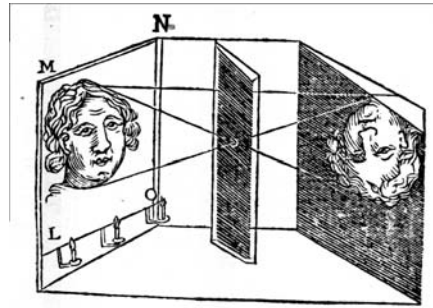


fig. 1.23 Cámara oscura

Por lo que se refiere a la visión, sus teorías son perspectivistas, con un pobre bagaje matemático y con errores graves de concepto pues afirma que el rayo es la línea por la que viajan las especies hasta el ojo. Toma el modelo del ojo de Vesalius acercando la posición del cristalino hacia la córnea, asignándole forma esférica.



Joannes Kepler (1571-1630)

La figura de Joannes Kepler merece un desarrollo que se puede encontrar en sus biografías. Pocas mentes tan claras y espíritus tan luchadores se han encontrado en la historia de la Ciencia. De un carácter introvertido y constitución enfermiza, era un devoto protestante que buscaba encontrar el lenguaje matemático divino en la Naturaleza. Su modestia expresada en el reconocimiento a Porta por sus hallazgos y las disculpas a los errores de Witelo, no le impedía repensar por sí mismo los problemas científicos hasta una profundidad desconocida hasta entonces. Se dice de él que fue el mejor matemático de su siglo, como apreció su maestro Tycho Brahe cuando le llama como ayudante al observatorio Astronómico de Praga en la corte de Rodolfo II. Fue una relación de respeto y odio en la que el aristócrata Thyco le humillaba con frecuencia.

Thyco aportaba su prodigiosa capacidad de observación de los cielos a ojo desnudo, sus precisos astrolabios y ballestillas y una ingente cantidad de posiciones de estrellas, planetas y eclipses mientras que Kepler ofrecía su formación matemática que le permitió organizar y analizar los datos. Un dato del que se necesitaba cierta precisión eran los diámetros de la Luna y el Sol observados directamente, mediante una ballestilla o sobre su proyección en una cámara oscura.

Fruto de estas colaboraciones es el comentario de Thyco acerca del motivo por el que, en las efemérides de los eclipses parciales de sol, las observaciones en una cámara oscura constataban que el diámetro de la Luna era menor en un veinte por ciento de las medidas realizadas con la luna llena. Thyco emite la posibilidad de que el astro se dilatase de forma periódica a la manera de pulsos.

El 30 de junio de 1600, Kepler observa en la ciudad de Gratz ,el eclipse solar provisto de un tubo largo sujeto a un trípode (*tubo óptico*), lo que le produce un entusiasmo tal que se decide a corregir las opiniones de Witelo que era la referencia a estos temas,de modo que se podía regular su inclinación horizontal y vertical. Perpendicularmente al eje, fijó dos dos discos a una distancia mutua regulable. En el primero practicó una rendija circular y el segundo servía de pantalla. Observando un eclipse a simple vista las intersecciones externas del Sol y la Luna se ven como cuernos agudos, pero a través de la rendija, se veían redondeados y borrosos . Además la imagen del Sol crecía mientras que la de la luna disminuía...La misma paradoja ocurría al observar de noche la fases de la Luna.



fig . 1.24. Eclipse de sol observado a través de las hojas de un árbol

Para Kepler , este hecho supuso una conmoción: en la búsqueda de medidas astronómicas concretas, se enfrentó de un lado al diámetro variable de la Luna dependiendo de su altura en el horizonte y de otro al observado en los eclipses, sin que su distancia a la Tierra variase en ambas situaciones. Por tanto para obtener medidas precisas en astronomía, había que analizar en primer lugar el proceso visual que daba lugar a estas paradojas y había que empezar por la cámara oscura como instrumento que permitía una observación más precisa que a ojo desnudo.

Sólo Francesco Maurolico y Leonardo da Vinci habían estudiado con cierto detalle la cámara oscura, pero sus trabajos eran aún desconocidos. Puesto a la obra, se enfrentó desde cero, a un problema antiguo: ¿Cómo es que cuando el sol atraviesa una rendija de contornos angulares, su proyección en una pantalla da bordes redondeados? Es el caso de los rayos de sol que al atravesar

parcialmente las hojas de los árboles, las tejas o las vidreras rotas, dan también proyecciones redondeadas. Witelo, 300 años antes no lo supo resolver, atribuyendo a los rayos luminosos la propiedad de curvarse, a lo que Kepler indica su error.

Una vez planteado el problema, mantuvo claro el principio de que la trayectoria de los rayos de luz debía ser siempre rectilínea y a la hora de aplicarlo, él mismo cuenta que construyó un ingenio basado en una idea del pintor Alberto Durero: supuesto un libro rectangular como un foco luminoso, y una rendija también rectangular que se suponía atravesada por rayos de luz, construyó una estructura de hilos con origen en el libro, tangentes a las paredes y vértices de la rendija, y destino en una supuesta pantalla. Variando las distancias relativas entre el foco y la rendija y la rendija con la pantalla, llegó a establecer tanto las razones de la imagen invertida, como a constatar que esa imagen aparece con los límites borrosos así como con un tamaño mayor.

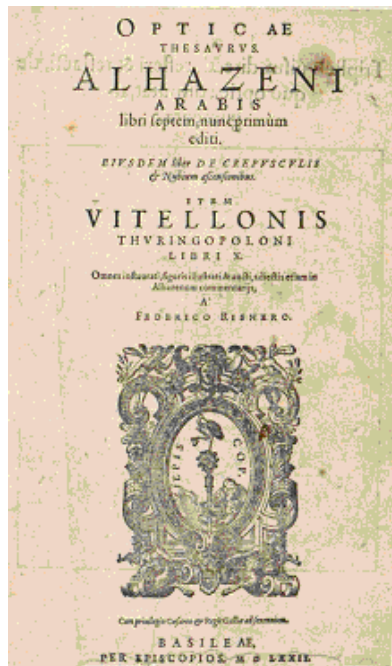


fig . 1.25 La Ópticae Tessaurus



fig . 1.26 La Óptica de Kepler

En 1572 aparece en Basilea un libro clave, la '*Opticae Thesaurus*' (*Tesoros de Óptica*), editado en la imprenta por el profesor de la Universidad de Paris, Friedrich Risner. En él se recogen el texto de Alhazen '*Kitab al Manazir*', (a veces '*Óptica* ') y el de de Witelo '*Perspectiva*'. Tras trescientos años de ostracismo, ambos, junto con el '*Magia Naturalis*' de Porta, proporcionaron a Kepler la documentación básica para sus trabajos de Óptica.

En un texto poco conocido, ‘*Ad Vitellionem Paralipomenan*’ (Kepler, 2000) aparecido en 1604 , cuya traducción, ‘*Correcciones a Witelo*’, no da justicia a su contenido. Este libro es muchísimo más, pues en él a través de sucesivas proposiciones, comienza postulando las propiedades de la luz y sus relaciones con el color, en el capítulo II da la solución a la cuestión de Thyco , que no era más que una aplicación de cómo radia la luz a través de rendijas.

El análisis de la cámara oscura se inicia a partir de dos proposiciones triviales: la primera se afirma que un foco puntual que atraviesa una ventana triangular produce una imagen triangular en una pantalla y la segunda que si la ventana fuera puntual y la fuente triangular, la imagen sería triangular pero invertida. Las figuras del texto lo indican con claridad.

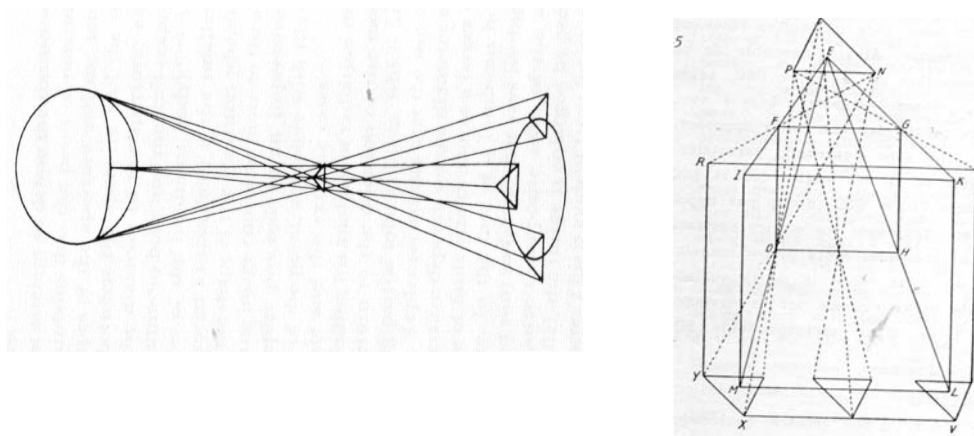


fig . 1.27. Sombra de una cavidad con aristas

La combinación de ambos, corrige el error de Witelo : la imagen de un foco triangular a través de una rendija rectangular, da otra con los contornos redondeados. Además variando la distancias foco –ventana y ventana –foco este efecto se pronunciaba o disminuía. Su demostración, no difícil , viene en el texto original.

Y es ahora cuando Kepler da el paso trascendente: una rendija pequeña atravesada por los rayos solares , es un caso particular del teorema anterior. A medida que la pantalla se aleja de la rendija de modo que la relación de la dimensión de la ventana a su distancia a la pantalla se haga menor que la del Sol a la suya, las imágenes se hacen cada vez más circulares.

La proposición X del capítulo II es para mi gusto uno de los hitos de la óptica geométrica. A partir del discurso anterior , la imagen del eclipse solar a través de una ventana circular se vería según el gráfico adjunto. DACE sería la imagen real del sol si la ventana fuera puntual. Sin embargo , debido a las dimensiones de ésta los puntos D, A, C y E se difuminan en radios DH, AB, FC, EG

y el resultado es que su contorno , en el que los cuernos se redondean, crece mientras que el de la Luna disminuye.

D.C. Lindberg (1976), quizás el mejor historiador de la óptica antigua, propone dos dibujos aclaratorios suplementarios que también adjunto. En el primero se justifica que el tamaño de la imagen se incrementa en la anchura de la rendija, suponiendo que dos rayos que salen del mismo punto del foco, llegan prácticamente paralelos a la rendija. En el segundo, el contorno real del Sol durante el eclipse sería la línea de puntos , más pequeña que la observada , mientras que la sombra de la luna se ve más pequeña.



fig. 1.29 La luna vista en un eclipse. Los cuernos se ven redondeados.

El capítulo IV lo dedica , a la refracción , aunque no llega a establecer la ley del seno. Sin embargo , jugando con ángulos pequeños de incidencia (la zona paraxial), postuló que la relación entre ángulo de incidencia a ángulo de refracción es de $3/2$, que coincide prácticamente con el valor actual $n= 1,52$.

Finalmente el capítulo V es la cumbre de su obra. Otro persona , tras los descubrimientos anteriores consideraría justificada una vida, pero no era su caso. Tras cerrar este tema, a lo mejor inspirado en el nuevo mundo de Witelo y Alhazen, decidió continuar investigando el teña de la visión. Su maestro Thyco había muerto de una infección en la vejiga en el año 1600 por lo que el emperador Rodolfo II, le encargó ocupar su puesto de observador real en Praga.

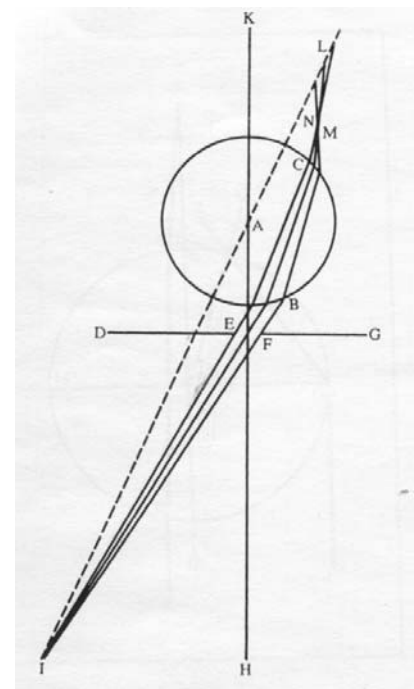


fig . 1.30 Dioptrio esférico en Kepler

Súbitamente se enfrentó a tres tareas, que una vez finalizadas, podrían darle el prestigio necesario: el estudio de los datos de Marte, la elaboración de las tablas astronómicas “rodolfinas” y la nueva aventura de la visión.

El pánico de sus antecesores de aceptar la inversión de la imagen, y el conocimiento superficial de la refracción habían estancado el problema de la visión. Enfrentado a él, Kepler dió otro paso de gigante : el anatomista Platter había reivindicado el papel de la retina como lugar sensitivo donde se formaría la imagen , pero falto de conocimientos básicos de refracción, se quedó en una exposición anatómica. Kepler había hecho experiencias de refracción en globos llenos de agua, observando cómo, por la aberración esférica, los rayos paralelos al eje en las regiones próximas, enfocaban en distinto lugar que los alejados. Decide entonces diafragmar el globo, dejando sólo una pequeña abertura central, y ve que en esta situación , el foco es aproximadamente puntual. El paso inmediato fue el de relacionar su globo con el ojo , donde la pupila haría el papel de diafragma. Tuvo que resolver otro problema difícil pues conocía superficialmente las propiedades de las lentes de converger o diverger los rayos, y el cristalino tenía forma lenticular , no esférica como su globo. Decide entonces que todos los medios tendrían un poder refractivo promedio, con lo que el problema se reduce a considerar la refracción en una esfera.

A partir de aquí, todo era avanzar. Los medios del ojo, aunque refractivos, eran traslúcidos, lo que justificaba que no había motivo para suponer que quedasen parados en el cristalino, la correspondencia punto a punto, así como la multiplicidad de los rayos quedaban soslayadas por la propiedad de la esfera de converger los rayos que salen de un punto del objeto a otro de la pantalla situado en el foco de la lente esférica. Todo ello se veía coherente, ¿pero qué ocurría con la inversión de la imagen? Kepler avanza el peldaño final y enuncia que el problema óptico finaliza en la retina, y que es el nervio óptico el que transporta la información al cerebro por otros medios desconocidos, donde la apreciamos erguida.

Aunque *Kepler* no hace gráficos de su teoría, treinta años más tarde , el religioso jesuita Cristoph Schneier (1575-1650) profesor de Astronomía y Matemáticas de la Universidad de Langstad, descubridor, con Galileo de las manchas solares, diseccionó las capas posteriores de un ojo de buey y al colocarlo en un pequeño agujero practicado en una contraventana de madera, vió proyectada en la retina descubierta, la imagen invertida del paisaje exterior. Descartes , treinta años más tarde, repitió la experiencia y dibujó un diagrama , ya clásico, esclarecedor.

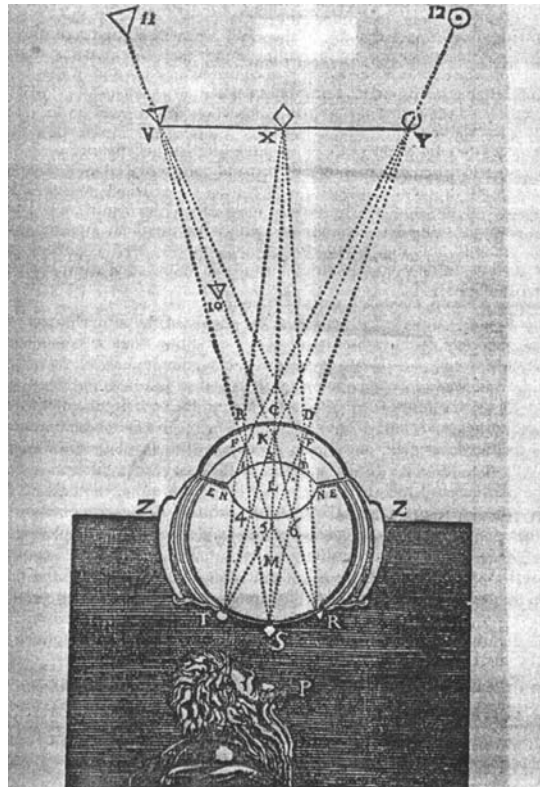


fig . 1.31 La retina como pantalla de la imagen que forma el cristalino en Descartes

... Pero tal afirmación no obsta el que sea verdad que los objetos que observamos impriman en el fondo del ojo imágenes suficientemente perfectas, tal y como algunos ya han explicado muy ingeniosamente, comparándolas con las que se producen en una habitación cuando, estando totalmente cerrada, con excepción de un solo orificio, y emplazando ante éste un vidrio en forma de pequeña lente, se coloca una tela blanca a cierta distancia, sobre la cual la luz, procedente de los objetos exteriores, forma sus imágenes. Establecen tal comparación, pues afirman que la habitación equivale al ojo, el orificio a la pupila, el vidrio al humor cristalino, o más bien a todas las partes del mismo que producen refracción y la tela blanca a la piel interior, formada por las extremidades del nervio óptico. Pero podéis confirmar con más seguridad esto si, tomando el ojo de un hombre muerto recientemente o, en su defecto, el de un buey o el de otro animal de gran tamaño, cortáis con destreza las tres pieles que le rodean, de forma que una gran parte del humor M, contenido en su interior, permanezca al descubierto sin que nada del mismo se vierta; posteriormente, habiéndolo recubierto con algún cuerpo blanco que sea tan ligero como para que la luz lo traspase como, por ejemplo, un trozo de papel o la cáscara de un huevo RST, se colocará este ojo en el orificio de una ventana expresamente construida, como Z, de forma que tenga delante BCB, y se orientará hacia algún lugar donde estén situados diversos objetos, como V, X, Y, iluminados por el sol. Será la parte posterior donde debe situarse el cuerpo blanco RST, hacia el interior de la cámara, P, en la que vos estaréis y en la que no debe entrar luz alguna más que la que puede penetrar a través del ojo, cuyas partes ya conocéis que son transparentes, desde C hasta S. Así pues, realizado todo esto, si dirigís vuestra mirada sobre el cuerpo blanco RST, veréis un dibujo, no sin admiración ni placer, que presentará muy simplemente en perspectiva todos los objetos situados fuera, hacia VXY, al menos si disponéis todo de suerte que tal ojo retenga la forma natural y proporcionada a la distancia en que estos objetos están situados, pues una pequeña diferencia motivará que esta figura sea más difusa. Y es preciso señalar que se le debe presionar un poco más y hacer su figura un poco más alargada cuando los objetos están muy cercanos, que cuando están más alejados... (Descartes, 1981)

Vemos que adelanta en más de un siglo la acomodación del cristalino atribuída a Young.

La ‘*Dioptrice*’ y el tubo óptico

En el año 1610, Galileo publica su ‘*Sidereus Nuntius*’ en donde publica sus observaciones de los satélites de Júpiter, fases lunares y manchas solares, tras la fabricación de un telescopio. Kepler (miope acusado) intenta construir uno sin éxito y consigue que su amigo Galileo le envíe uno con el que repite las observaciones con éxito. Invadido de un entusiasmo desmedido, en solo un año, es capaz de establecer el cuerpo teórico de estos aparatos. En el año 1611 aparece su libro ‘*Dioptrice*’ en el que en más de 100 proposiciones, a partir del concepto empírico de distancia focal de lentes plano convexas, convexas, convergente y biconcavas, diagnostica y corrige las ametropías del ojo, establece las teorías de los telescopios de Galileo y Kepler (el astronómico) en un lenguaje muy duro para nuestra época para describir conceptos hoy sencillos. Sin embargo no consigue descifrar la proporcionalidad entre los senos de los ángulos de incidencia y refracción.

Desde nuestra perspectiva actual, su ‘*Óptica*’, no es más que un procedimiento mecánico de trazado de rayos que convergen hacia un foco, pero pensemos que hasta entonces no había nada más que intuiciones de Porta y Maurolico. Poco después, su dominio en el diseño de telescopios le ayuda en las observaciones para la redacción de su ‘*Astronomía Nova*’, un hito en la literatura científica.

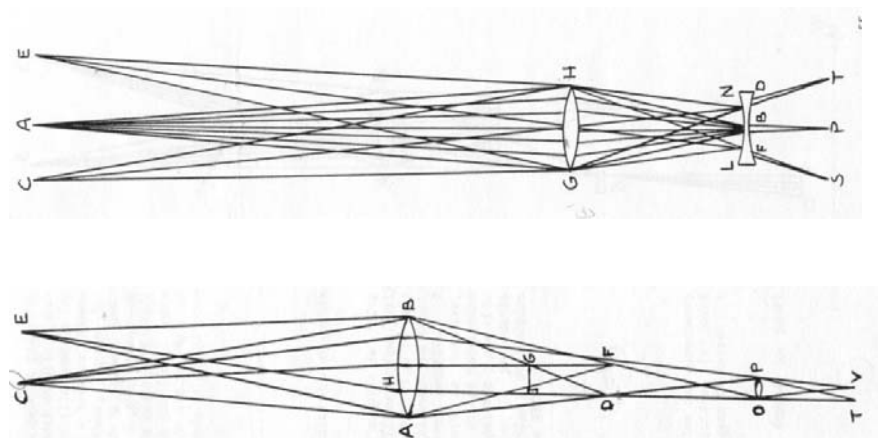


fig.1.32.. Diagramas de Telescopio terrestre y astronómico según Kepler

Rodeado de condiciones muy duras, guerras de religión de las que tuvo que huir, víctima de los desplantes de su maestro Tycho, obligado a defender a su madre de la acusación de brujería y condenado a vivir en la pobreza al final de sus días, parece imposible encontrar la fuente de esa determinación si no es su acendrada religiosidad. Mientras que Galileo es hoy una figura justamente valorada, Kepler no ha conseguido el total reconocimiento público que merecen su vida y su obra

5.2 LOS PARADIGMAS ÓPTICOS DE LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA

5.2.1 Los prolegómenos

Se conviene acordar que la Revolución Científica abarca las fechas comprendidas entre la juventud de Galileo y la vejez de Newton. Aunque sean de sobra conocidos los paradigmas geocéntrico y heliocéntrico de este tiempo, sus dos homónimos ópticos contemporáneos de ese tiempo, ondulatorio y corpuscular respectivamente, se distorsionan con frecuencia. Un análisis más profundo implica conocer la dialéctica en el tiempo de los cuerpos conceptuales que se sucedieron hasta abocar a las dos teorías irreconciliables. Aunque desde una perspectiva actual es fácil destacar las limitaciones y errores de los dos paradigmas que dominaron este siglo, una crítica simplista puede poner en evidencia nuestro propio desconocimiento del fenómeno científico, asignándole fundamentalmente el papel de una colección de hechos sólidamente contrastados. No fue nada fácil, partiendo desde casi cero, reordenar las experiencias existentes, hacer acopio de otras y elaborar los nuevos modelos que las hicieran más inteligibles. Una visión miope de la ciencia como una colección de hechos y propiedades, es útil para técnicos que construyen aparatos ópticos o sanitarios que corrigen problemas de la visión, pero no para científicos y ciudadanos que defienden que la cultura científica es tan desable como la humanista para su patrimonio. Es por ello por lo que he procurado enmarcar la historia de los conceptos dentro de los contextos culturales más amplios de la época hasta donde me lo ha permitido mi laguna humanista.

La mayor prosperidad de las sociedades civiles, iniciada ya en el siglo XII, tomó un nuevo empuje en el Renacimiento fruto del incremento del comercio, trajo consigo la aparición de una burguesía seglar que reivindicó su cota de protagonismo. La cultura, hasta entonces en manos de las Universidades medievales, se mostraba incapaz de responder a los nuevos desafíos. Sus enseñanzas escolásticas, el Trivium (gramática, retórica y dialéctica) y el Quadrivium (aritmética, geometría, música y astronomía), eran una herencia mal digerida de Aristóteles y Platón que en las discusiones sobre explicación de los fenómenos, utilizaban como último recurso un verbalismo que acudía a la existencia de causas ocultas y a la autoridad de los patriarcas tanto helénicos como eclesiásticos. El hombre era para ellos incapaz del conocimiento natural y su propio círculo les obligaba a cerrarse a las nuevas evidencias, que los espíritus más lúcidos de la época empezaban a suscribir.

La aparición de las nuevas clases sociales y el apoyo de las monarquías, se tradujo en la creación de focos de cultura, menos rígidos que las universidades y favorecidos incluso por las monarquías como es el caso del Collège Royal de Paris cuyas enseñanzas se oponían abiertamente a las de la Sorbona. En aquel tiempo, se multiplicaron las sociedades científicas en Francia, Italia, Alemania, Inglaterra y Rusia, con tal éxito, que los centros de investigación científica ya no fueron las universidades sino las academias que ellas regentaban y la correspondencia internacional entre científicos se extendió a todo el continente europeo. Los científicos viajaban por doquier para conocer las culturas ajenas, compartir conocimientos y programar incluso expediciones científicas. Recordemos la de Uranibourg (Dinamarca) para medir la diferencia de latitud entre esta población y Paris a cargo de Jean Picard y Römer, la de Jean Richer para observar las estrellas australes y la variación de los movimientos pendulares a la Guayana, o la de Pierre Louis Maupertius a Laponia para medir el arco del meridiano terrestre. En esta eclosión cultural, proliferaron los periódicos y boletines científicos por toda Europa y la ciencia se veía con el beneplácito real como una tarea internacional, colectiva, con un fin no utilitario y con ribetes de *divertimento*. Tanto fue el entusiasmo para algunos, que fundaron en 1684 el periódico '*La República de las letras*' para la nueva hermandad internacional de hombres y mujeres amantes del saber y el arte. Un escritor de la época, Vigneul-Marville (1701), diría sobre ella:

...Está compuesta de gentes de todas las naciones, de toda condición, de toda edad y de todo sexo.... En ella se hablan toda clase de lenguas vivas y muertas. Las artes se mezclan con las letras, y los mecánicos tienen su lugar en ella, pero la religión no es uniforme en ella y las costumbres, como en las demás repúblicas, están mezcladas para bien y para mal.

Los protagonistas culturales de la época debieron afrontar pues, una doble realidad: de un lado el protagonismo de la citada república y de otro la tradición escolástica, cuyo desvío estaba castigado con la muerte aunque las nuevas monarquías no fueran muy entusiastas en la aplicación de esta norma. Los espíritus más libres se sentían reforzados en este contexto y comenzaron a expresar declaraciones de abierta oposición a las antiguas ataduras.

Así por ejemplo, el sabio florentino Galileo (1994) polemiza contra el *mundo de papel* de los aristotélicos y del recurso sistemático a los escritos eclesiásticos en términos nada ambiguos.

...Nada es más vergonzoso que recurrir en las discusiones científicas a textos que muchas veces se escriben con otro propósito y pretender responder con ellos a observaciones y experiencias directas

Descartes no es menos crudo cuando recuerda con especial desagrado su formación académica en una filosofía que confundía la realidad con las palabras que la describen, por lo que decide comenzar su propio sistema a partir de una duda sistemática en la que sólo se reconocen pocas certezas evidentes desde las que se deduce no sólo un sistema filosófico y matemático, sino

también un modelo del mundo muy ingenioso pero plagado de errores, que Leibnitz describiría más tarde como *una bonita invención*.

La escuela inglesa dirigida por Francis Bacon, heredó la tradición experimentalista de Grosseteste y Roger Bacon pero la estructuró de modo más sólido. Este último es muy crítico con Aristóteles cuando dice que su lógica sólo sirve para derrotar al contrario. Como metodología de investigación de la Naturaleza, defiende la inducción (distinta de la inducción aristotélica pueril), desde los hechos particulares hasta la generalización, como herramienta necesaria para establecer leyes científicas y el experimento controlado en un laboratorio, acompañado de la formalización de tablas numéricas. Bacon acuña el término “*Experimentum Crucis*” (experimento crucial) que se propone como la herramienta definitiva a la hora de dilucidar entre dos teorías propuestas igualmente válidas en principio, y aunque no lo aplica, sí lo hacen Boyle, Hooke y Newton.

Un profesor de Cambridge, Roger Cotes, que prologa los Principia de Newton (1982) resume muy bien las tres vías de acercarse a la ciencia de esos tiempos.

Hay tres clases de filosofía natural:

- *La primera es aquella que asigna causas ocultas y específicas a las diferentes cosas. Los diversos efectos de los cuerpos surgen de las naturalezas particulares de los cuerpos. Pero no dicen de donde provienen esas naturalezas*
- *Otros la rechazan como fárrago inútil de palabras. Defienden que toda materia es homogénea y que la variedad surge de afecciones muy sencillas y simples de sus partículas componentes. También se toman la libertad de imaginar figuras y magnitudes desconocidas, situaciones inciertas y movimientos de las partes, suponen fluidos ocultos dotados de sutileza omnipresente. Parten de hipótesis que pueden dar lugar a una bonita fábula.*
- *Los que asumen como principio nada que no esté probado por los fenómenos. Proceden por análisis de las fuerzas de la naturaleza y las leyes de esas fuerzas. Y desde allí, por síntesis, muestran la constitución del resto.*

La minoría culta de la época asistió a una incesante aparición de nuevos fenómenos, pero también a la elaboración de nuevas teorías y de herramientas para su estudio. La polémica que se iniciaba no era fácil pues había que repensar cuestiones polémicas como ¿qué es el conocimiento de la realidad? ¿en qué consiste la ciencia? ¿basta con desentrañar las regularidades en forma de leyes matemáticas que nos sirvan para predecir nuevas situaciones, o hay que describir las causas últimas? ¿qué peso deben tener la experiencia y el sentido común en la investigación?

Las dos referencias a la filosofía natural de la época, son el francés Descartes y el inglés Isaac Newton. Descartes, más filósofo y matemático, ideó un sistema integral, que para interpretar la Naturaleza, propone las explicaciones mecanicistas que justifican las interacciones entre cuerpos a partir de choques entre partículas, de presiones transmitidas y de arrastre de los cuerpos grandes

por un “*plenum*” continuo de materia. Newton sin embargo, centra su atención en las leyes matemáticas, y sólo de modo marginal, sugiere en ocasiones hipótesis no demostrables a las que no se adhiere incondicionalmente. No le importa en ellas invocar la existencia de un éter hipotético o de fuerzas ocultas entre átomos de materia-materia o de materia-luz.

Si nos ceñimos a la óptica de este período, tras la ruptura con los motivos y métodos de la óptica antigua, asistimos también a cambios copernicanos: se deslindan en lo posible las causas naturales de las divinas, se profundiza también en los cómo y los porqués, y, cada vez más, se acude al arbitraje de la experiencia en los casos de conflicto sobre la interpretación de naturaleza de la realidad.

Aunque Kepler había asentado suficientemente claro el papel de la retina en la visión, la concepción de la luz era unánimamente aristotélica. Recordemos que para Aristóteles (1970a), el concepto de espacio vacío como la existencia de un no-ser, era inaceptable. Para él, la luz no era una sustancia ni un cuerpo sino un accidente, la actualidad de la cualidad del medio transparente en la presencia de un fuego o el Sol. La potencialidad del transparente sería la oscuridad y la transición de la potencia al acto luminoso sucedería por la influencia del fuego o de los cuerpos brillantes celestes. También para él, los colores serían cualidades de los objetos que se hacen actuales en los cuerpos no totalmente transparentes. Por ello no nos extraña que Aristóteles (1970b) llame a la luz *el color del transparente*.

Frente a esta herencia que prefería apoyarse en el sentido común más que en la experiencia, fueron necesarias personas e instituciones valientes que se atrevieron a contestarla.

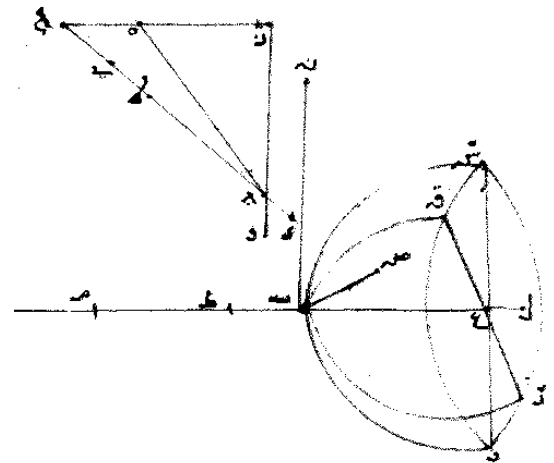


5.2.2 Historia del índice de refracción

Para el científico Ernst Mach (1926), la historia de la refracción es uno de los ejemplos más representativos de la evolución de la Ciencia desde Ptolomeo hasta Newton pues ejemplifica íntegramente sus métodos, objetivos y connotaciones culturales. Salvando las distancias que me separan de su genio y cultura, suscribo incondicionalmente esta afirmación por lo que me detendré en su desarrollo:

El hecho de que los rayos rectilíneos se desviasen de la dirección normal a la superficie de discontinuidad de dos medios transparentes de densidades distintas, fue investigado repetidas veces en la óptica antigua como es el caso de Ptolomeo que ya tabuló los ángulos de incidencia y refracción intentando buscar, sin éxito, la ley que los relaciona.

La descripción geométrica de la refracción fue ya conocida y escrita por Abu Sa'da Ibn Sahl (940-1000), cuando trabajaba en la corte Abassid de Bagdad, como se sabe por su manuscrito recientemente descubierto '*On the burning mirrors*' (Rashed, 1990) pero se olvidó en el tiempo pues en el texto '*Kitab al Manazir*' de Alhazen no aparece un conocimiento explícito de la ley de la refracción, a pesar de sus experiencias con lentes de varias curvaturas. Sabemos que éste tuvo acceso a los manuscritos de su antecesor Ibn Shal, luego entra en lo posible que no les prestara credibilidad.



لانه ان ماشه عليها سطح مستوي غيره فلا ان هذا السطح يقطع سطحين من
على نقطة ب فلا يات من ان يقطع احد خطي ب ن بص فليكن ذلك
الخط بصر والفصل المشترك بين هذا السطح وبين سطح قطع ق د
خط ب ش فلا ان هذا السطح يات من مسيط ب على نقطة ب خط
ب ش يات من قطع ق د على نقطة ب وكذلك خط بصر وهذا حال
فلا يات من مسيط ب على نقطة ب سطح مستوي سطح ب ن ص ٥

fig. 2.1 Manuscritos de Abu Sa'da Ibn Sahl

Tras el páramo medieval, en 1610, Galileo con la sola referencia de la construcción de un telescopio en Holanda, construye su propio telescopio a partir de ensayos y aciertos sucesivos sin entender bien el funcionamiento de las lentes.

Kepler llegó a un conocimiento empírico de las mismas bastante preciso como evidencia la mejora de su telescopio respecto al de Galileo y el enunciado de su principio expuesto en su texto '*Dioptrice*' de que los rayos paralelos paraxiales convergen en un foco y que los ángulos de

los rayos incidente sobre una lente y el refractado en ella, eran proporcionales siempre que el primero no se desviasen mucho del centro de la lente (Kepler, 1611).

Aunque tampoco es conocido del público no especialista, la ley de la refracción la enunció ya correctamente el inglés Thomas Harriot (1560-1621) en el año 1601 donde describe en unos papeles privados la distinta refracción de las luces de colores diferentes (más tarde llamada ley de Snell), como reconocería Newton un siglo más tarde, e incluso la aplicó a la fabricación de un telescopio contemporáneo al de Galileo. Desgraciadamente para la Ciencia, prefirió viajar y trabajar como instructor de un rico hacendado, y no publicó sus resultados.



En el año 1621, el astrónomo holandés Willibrord van Roijen Snell (1580-1626) tampoco llegó a publicar los resultados de sus investigaciones pero sabemos de sus manuscritos gracias a la correspondencia que sostuvo con sus amigos y a las referencias que de él hace su compatriota Huygens varios años más tarde.

Snell investigó el aparente cambio de la profundidad del fondo de un recipiente al llenarlo con agua. Es probable que tomase medidas basadas en las trayectorias del rayo luminoso sobre una pared horizontal y que estableciera la constancia del cociente OJ/OI independientemente del ángulo de incidencia. Sin embargo la expresión definitiva de su ley, fácilmente deducible de la anterior relación, es:

$$OJ/OC = \text{cte}$$

La justificación del fenómeno la atribuyó Snell a que el rayo de luz, incrementaba su velocidad al llegar a un medio más denso.

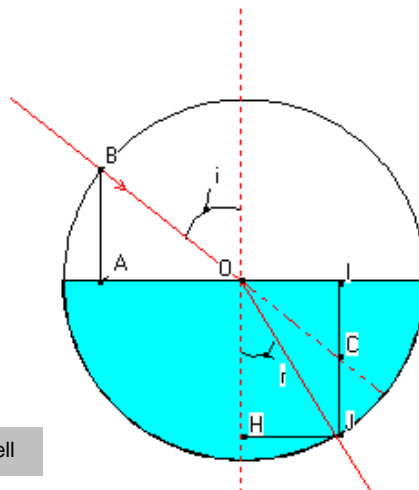


fig . 2.2 Expresión original de la ley de Snell

Todo parecía una pequeña anécdota hasta que irrumpe en la historia un noble francés que renovó el saber de su tiempo.

La Refracción en René Descartes

Nace René Descartes en 1597 en la Haye (Francia) de una familia de la mediana nobleza y estudia en el colegio de jesuitas la Flèche, al que asistían los hijos de las clases altas. En él adquiere una sólida formación clásica y matemática, pero no filosófica de lo que siempre se quejó. Finalizados sus estudios de Derecho en 1616 sale de ellos con una gran curiosidad intelectual e inicia una larga trayectoria viajera por toda Europa. Al principio se enrola como voluntario no combatiente en los ejércitos de Mauricio de Nassau y después con Maximiliano de Baviera.



Abandona después el ejército, pasa largas temporadas en Holanda bajo la amenaza de la posible condena de sus ideas heliocéntricas, y, al final de sus días recaló en Suecia, donde instruye a la reina Catalina en temas de filosofía. La débil constitución física de Descartes, unida a las costumbres espartanas de la princesa, a quien le apetecía dar las clases de madrugada y en una sala muy fría, le costaron una grave afección pulmonar que acabó con su vida.

En sus largas temporadas invernales de ocio en los campamentos militares (los ejércitos convenían en hacer treguas si el tiempo era crudo), tuvo tiempo y soledad suficientes para iniciar un sistema filosófico que desplazaría al escolástico. En sus escritos de madurez, recuerda cómo se inicia su obra escrita:

...El comienzo del invierno me detuvo en un cuartel, donde, no encontrando ninguna conversación que me divertiera ni pasiones, ni preocupaciones que me turbasen, permanecía sólo frente a una estufa, donde disfrutaba de todo el ocio para entretenerme con mis pensamientos (Discurso del Método, Descartes, 1981)

En su lucha contra las explicaciones escolásticas que tenían como argumento de certeza los principios básicos de Aristóteles, defendía que hay que dudar de todo y quedarnos con certezas absolutas básicas para construir a partir de ellas su nuevo sistema. A tal fin establece su propia metodología: comienza dudando de la validez de un conocimiento que confunde la realidad con las palabras que la representan, y acude a los experimentos, intentando traducir las leyes que encubren. A pesar de sus propósitos iniciales y para explicar los porqués, acude a las analogías con otros fenómenos, reminiscencia de los métodos antiguos, que al no poder ser contrastadas por la experiencia, tampoco serán fiables. Aunque afirma que cada cosa debe ser evidente fuera de las

causas oscuras, hereda todas las ideas pedantes. Llena la física de ideas maravillosas, haciéndola, según Leibnitz, un *bonito romance*.

Como Aristóteles, inventó una nueva cosmología en la que prima la especulación, basada en interacciones mecanicistas entre partículas materiales en íntimo contacto .Veamos un sucinto resumen:

“Desde la Creación, hay una sola clase de materia que llena de modo continuo todo el universo. Esta materia está dotada de movimientos que generan choques violentos entre partículas que provocan roturas entre ellas y la subsiguiente división por tamaño en pequeñísimas partículas del primer elemento (éter en los astros luminosos), partículas medias impenetrables que constituyen el aire de los cielos, y las grandes que forman los planetas y cometas, arrastrados en su movimiento por el movimiento del aire. Las más pequeñas pueden penetrar los más pequeños poros de la materia. Postula como Galileo un principio de Inercia para las masas en movimiento, según el cual, los movimientos naturales de los cuerpos dotados de velocidad describen trayectorias rectas indefinidas, pero la presencia de ese plenum de materia provoca choques y, como consecuencia la materia describe órbitas circulares que él llama vórtices. Mecanicista empedernido, no creía en las acciones a distancia, sino que las fuerzas entre cuerpos son interacciones entre materia en movimiento. Existen pues varios vórtices en el universo. En el exterior de los vórtices están las más rápidas, casi rectilíneas”.

Sus tesis sobre la luz, se basan también en este modelo: asocia la luz a ondas de presión entre sus conocidos vórtices aunque a veces, para explicar los colores, los relaciona con la rotación de las pequeñas partículas. Los cuerpos perfectamente fluidos integrados por partículas de la materia fuego, que giran a mayor velocidad que los que les rodean exudan materia fina (materia del fuego), que en su presión sobre la materia adyacente , cuyos poros, a su vez, están llenos de la materia fuego, generan una presión inmediata llamada luz. La radiación uniforme desde el sol es debida a la fuerza centrífuga que expulsa a la luz materia. Quizás deliberadamente es impreciso y contradictorio en sus concepciones de la naturaleza de la luz, pues a veces la expresa como una acción, otras como movimiento y otras como potencia, lo que sirve para argumentar a su conveniencia sobre bases distintas.

Cuando relaciona la luz con la presión que ejerce el vino situado en un cesto con uvas agujereado en dos puntos laterales A y B a pesar de los obstáculos que encuentra, la entiende como una acción.

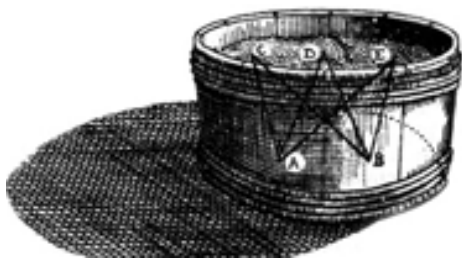


fig . 2.3 La analogía de la propagación de la presión luminosa en el éter con la del vino en una cuba con uvas hasta los orificios finales

...Destaquemos que hay que distinguir entre el movimiento y la acción o inclinación a moverse. Pues es fácil entender que las partes del vino que están, por ejemplo en C, tienden tanto hacia B como A, aunque no puedan moverse hacia ambos lados a la vez; y que tienden además en línea recta aunque no puedan moverse en esa línea a causa de los racimos que están entre ellos. Y así, pensando que no es tanto el movimiento sino la acción de los cuerpos luminosos lo que hay que entender como su luz, no son otra cosa sino las líneas según las cuales tiende esta acción. De modo que hay una infinidad de rayos que salen de todos los puntos de los cuerpos luminosos hacia todos los puntos de los que iluminan, así que podéis imaginar una infinidad de líneas rectas según las cuales, las acciones, que vienen de todos los puntos de la superficie del vino CDE, tienden hacia A, y una infinidad de otras, según las cuales, las acciones, que vienen de los mismos puntos, tienden también hacia B, sin que las unas interfieran con las otras (Dioptrique 2º discurso, Descartes, 1981)

Sin embargo, en otros momentos la define como movimiento y acción:

...Cuando he dicho que no es otra cosa que un cierto movimiento o acción recibida de una materia muy sutil que llena los poros de los otros cuerpos; y que ustedes consideren que, como una bala pierde más su agitación, chocando contra un cuerpo blando que contra uno duro, y que rueda peor sobre un tapiz que sobre una tabla rígida, así la acción de esta materia sutil puede ser más impedida por las partes de aire, que estando como blandas y mal unidas, no le hacen mucha resistencia, que por las del agua que lo hacen en mayor grado, o incluso más por las del agua que por las del vidrio o el cristal.

También con la velocidad de la luz es contradictorio, pues a veces la define como una presión que se propaga en un instante como las uvas de un cesto o la perturbación del bastón de ciego que detecta el objeto, lo que implica una velocidad infinita, o a veces como una serie de partículas desplazándose a gran velocidad, distinta según la densidad del medio. Supone en ‘Le Monde’ escrito en 1633 y no publicado hasta varios años después, pues estaba recién dictada la condena de Galileo, un sistema heliocéntrico en el que la velocidad de la luz es instantánea (no utiliza el término *infinita*), mientras que en su ‘Dioptrique’ (1637), explica la refracción y reflexión mediante la analogía de un jugador de raquetas, admite velocidades finitas y distintas según el medio.

Sus contemporáneos ya le reprochaban las contradictorias explicaciones que esgrimía a su conveniencia para demostrar los fenómenos (Descartes, 1996) a lo que responde que son soslayables si se entiende que la luz como potencia (presión o tendencia) y la luz como acción, que serían las pequeñas bolas viajando con velocidad finita, tendrían propiedades semejantes. De un lado, el primer modelo le permite explicar la claridad que aparece en un medio transparente cuando lo ilumina un foco luminoso, y el segundo, los efectos que aparecen cuando un rayo de luz atraviesa una rendija o los bordes de un prisma.



fig. 2.4 Analogía de la presión luminosa con la perturbación recogida en el bastón de un ciego

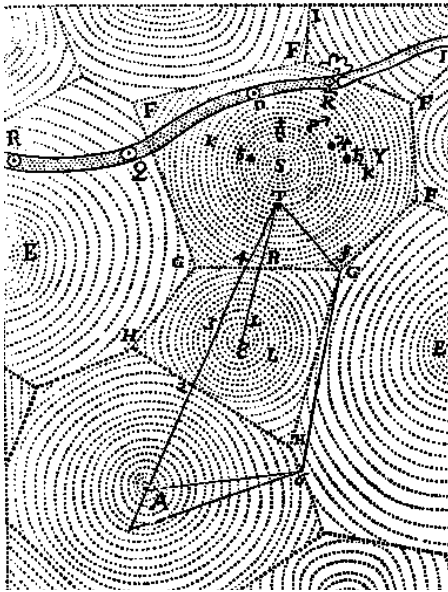


fig.2.5 Los torbellinos de Descartes: Vórtices de torbellinos de materia con el sol S en uno de los centros. La fuerza centrífuga del primer elemento en sus bordes, crea la presión luminosa que se propaga instantáneamente.

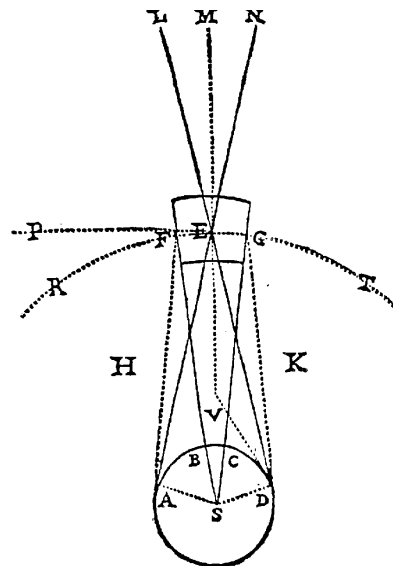


fig. 2.6 Un trozo de materia en la superficie FEG sufre la presión del resto de las partes adyacentes.

Publica en 1637 la ley de la refracción de Snell (Descartes, 1981) con un formalismo ligeramente distinto sin citar su origen. No es cierto aunque sí probable, que hubiera plagio aunque la puliera exhaustivamente. A un hábil geómetra como él le era fácil expresarla de otro modo como:

$$OA/OI = \text{cte}$$

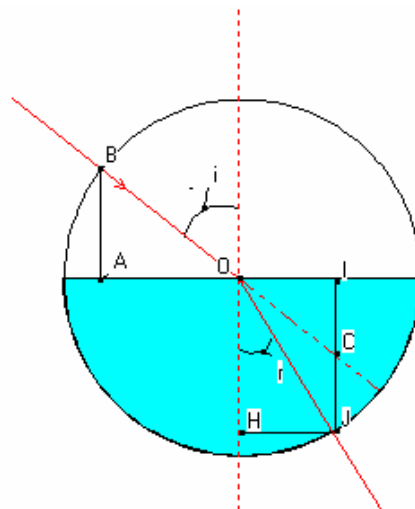


fig . 2.7 Descartes mejora el formalismo de la Ley de Snell

Básicamente su razonamiento sigue un símil mecánico a los que era tan aficionado:

...Si una pelota se impulsa con una raqueta, adquiere una velocidad en el sentido del impacto que se puede descomponer en dos componentes: una normal y otra paralela a la superficie de separación de ambos medios. Si hubiera una tela flexible sobre la superficie, mantendría intacta su componente horizontal y se desviaría de su trayectoria rectilínea ABD hasta la ABI, como ocurre con las bolas de los cañones cuando inciden en el agua de modo rasante.

...Si una bola de tenis llega a un medio acuoso según un ángulo no muy rasante, mantiene constante la componente horizontal pero la vertical se ve frenada por la viscosidad del líquido y el resultado es la trayectoria BI.

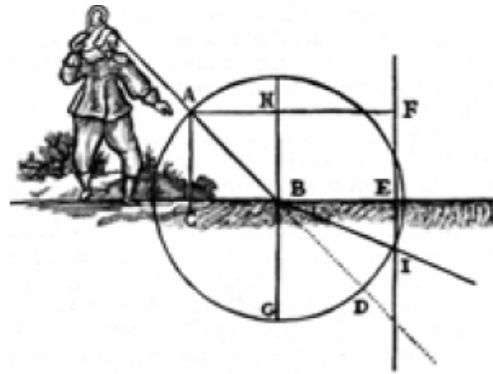


fig .2.8. Símil de la pelota en la refracción

Sin embargo para la luz el comportamiento es distinto pues el éter que impregna los poros del segundo medio, ofrece un medio de partículas ordenadas y compactas apto para las acciones (o movimientos) más rápidas de los rayos incidentes. La componente vertical de la velocidad del rayo AB se ve incrementada mientras que la horizontal se mantiene constante. Como consecuencia, el rayo refractado recorre, a igualdad de tiempos, más espacio según el eje vertical que en el horizontal, y ello resulta en que éste cierre su trayectoria según BI, respecto de la trayectoria inicial BD.

Según su modelo de las telas flexibles y de las bolas dotadas de impulso inicial, hay que aceptar que el segundo medio ofrece más facilidad al paso de la luz y por ello que la componente horizontal de la velocidad se incrementa. En este momento Descartes olvida su argumento anterior de que la luz viaja instantáneamente. Ahora recuerda que la luz es una acción recibida en una materia muy sutil (el éter) que llena los poros de los otros cuerpos, la acción de esta materia sutil puede ser impedida por las partes del aire, blandas y mal unidas. Sin embargo en las de agua y más aún en las de vidrio, las partículas son más duras y más firmes y puesto que en ellos la luz no encuentra partículas fuera de su sitio, argumenta ahora que en el segundo medio esa acción es más rápida.

Para reproducir el razonamiento de Descartes, analizamos la trayectoria de los rayos que recorren la misma distancia en los dos medios, pero a distinta velocidad. Mientras que la componente vertical varía, la horizontal se mantiene constante.

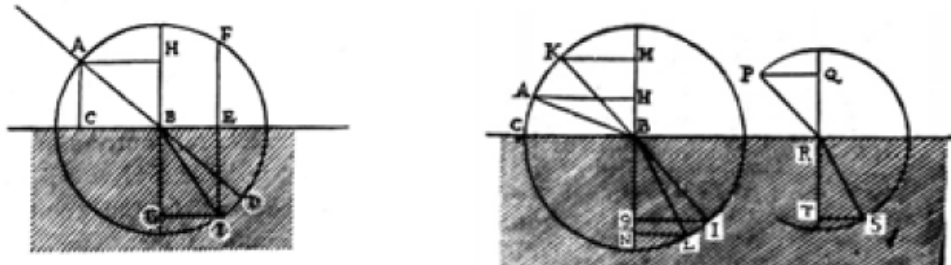


fig . 2.9 Deducción de la ley de Descartes por consideraciones cinéticas

Si el medio no cambiase, el rayo llegaría a D sin desviarse de su trayectoria inicial. Si la velocidad en el segundo medio fuera doble que en el primero, manteniendo la componente horizontal constante, el rayo recorrería una distancia horizontal BE mitad, de modo que $CB/BE = 2$. Para una velocidad arbitraria, su crecimiento relativo sería el cociente de los segmentos horizontales CB y BE.

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{CB}{BE}$$

...la fuerza o facilidad con la que la bala sale de la segunda superficie respecto de la primera, será el cociente entre la distancias de AC a HB y la de HB y FI.” (ver gráfico)

Es fácil ver que está enunciando la ley del seno a partir del supuesto de que la velocidad aumenta al pasar a un medio más denso, pero esta función, ya conocida, no la aplica a las demostraciones.

$$\begin{aligned} AH &= CB \\ EB &= IG \end{aligned}$$

$$\frac{CB}{BE} = \frac{\frac{CB}{R}}{\frac{BE}{R}} = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r}$$

Otra forma más intuitiva de verlo, respetando sus supuestos iniciales (Park, 1997), es la siguiente: supuesta la distancia BO la correspondiente a la que viaja el rayo en el primer medio durante 1 s y OD la que viaja el 2º rayo en el otro medio en el siguiente segundo, los radios OB y OD son espacios recorridos en 1 s, luego serán módulos de velocidad en cada medio. Como se mantiene constante la componente horizontal de la velocidad, también lo serán los espacios horizontales recorridos en tiempos iguales.

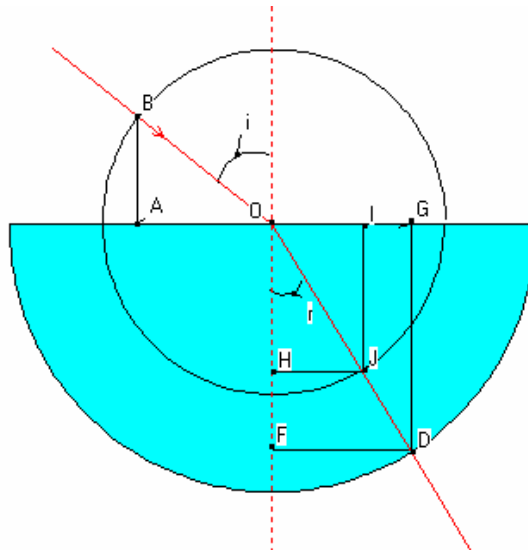


fig .2.10 La ley de Snell por otro razonamiento

$$BC = OG$$

luego

$$\text{sen } i = \frac{BC}{OB} = \frac{OG}{OB}$$

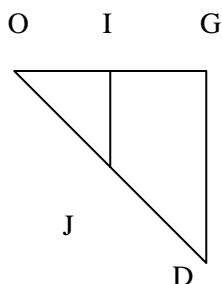
$$\text{sen } r = \frac{OG}{OD}$$

Dividiendo :

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{\frac{OG}{OB}}{\frac{OG}{OD}} = \frac{OD}{OB} = \frac{v_2}{v_1} = n_2$$

Donde n_2 es una constante que llamaremos índice de refracción del segundo medio respecto al primero. Comparando los triángulos OGD y IOJ, es fácil ver que esta demostración y la original son la misma, pues por semejanza de triángulos:

$$\frac{OD}{OH} = \frac{OG}{OI} = \frac{OA}{OI} = \frac{v_2}{v_1} = n_2$$



Es bien sabido que esta expresión es la base de toda la óptica geométrica, y aunque ahora sabemos que se fundamenta en el error de que la velocidad de la luz se incrementa al pasar a un medio más compacto, en aquella época el modelo parecía correcto por la coherencia que aportaba en las explicaciones de los fenómenos ópticos:

El aumento aparente de tamaño de los objetos sumergidos en agua producido por la torsión de los rayos desde un medio de menor a otro de mayor densidad.

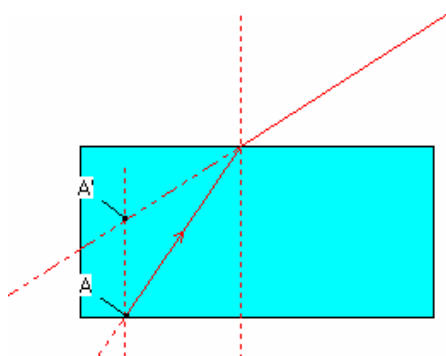


fig . 2.11
Lámina de caras plano-paralelas

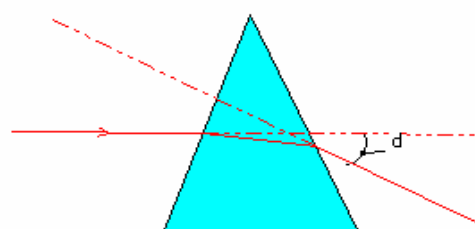


fig. 2.12
Ángulo de desviación en un prisma

En efecto, el rayo que sale del objeto A, sumergido en agua, se refracta al salir al aire, de modo que un observador externo lo sitúa en A'.

La desviación en prismas la explica por dos refracciones sucesivas de un rayo incidente. El ángulo que forman las prolongaciones de los rayos incidente y emergente, el ángulo de desviación d .

Si bien Descartes entiende perfectamente las aplicaciones de Snell a los distintos dioptrios, a la hora de interpretar el color que aparece cuando un rayo de luz blanca atraviesa el prisma, lo justifica de acuerdo con su modelo de bolas dotadas de velocidad, diciendo que en los bordes del obstáculo, las bolas chocan y adquieren un efecto de giro ya sea a izquierdas o derechas. Las bolas dotadas de uno u otro efecto serán los colores rojo o azul. Además, tras dos refracciones sucesivas, los efectos se anulan, y desaparece el color, como sucede (supuestamente) cuando un rayo de luz atraviesa dos láminas plano-paralelas. En el gráfico adjunto se indica que al incidir un rayo solar sobre un prisma en cuya base inferior se dispone una rendija y colocada una pantalla de papel blanco perpendicularmente a ella, PKFG, se observa el color rojo en la zona F, violeta en K y blanco en medio.

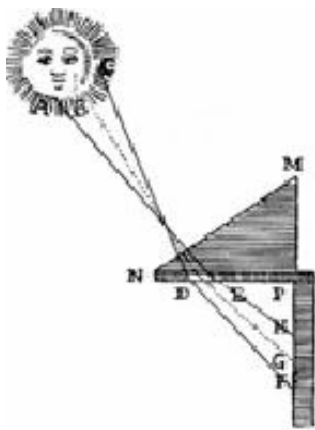


fig . 2.13 Creación de colores en un prisma por giros inducidos en los corpúsculos blancos que golpean las paredes de una rendija, choques según Descartes

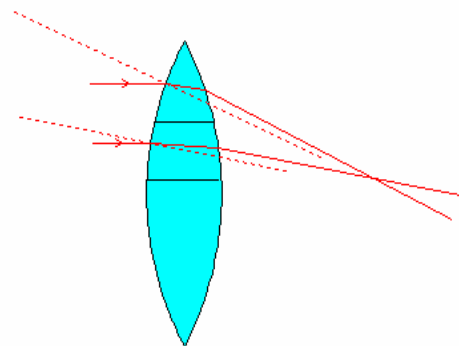


fig. 2.14 Las lentes como caso límite de prismas

Veamos ahora cómo aplica su relación a las lentes, dado que se pueden entender como el caso límite de varios prismas triangulares o trapezoidales superpuestos, través de los cuales inciden los diferentes rayos. El aparato matemático es el mismo, con la salvedad de que en las situaciones corrientes sólo se estudian los rayos paralelos próximos al eje óptico (rayos paraxiales), a fin de obviar las aberraciones.

Aplicando Snell a las lentes, explica con mucha aproximación, cómo los rayos que inciden paralelamente al eje de una lente, al pasar de un medio menos denso (aire) a otro más denso (vidrio), cambian su trayectoria y convergen en un punto llamado foco. De igual modo, si sale un haz divergente de rayos del punto denominado *foco*, al llegar a la lente, los rayos se desvían paralelamente al eje. A partir de ese momento, el predecir el tamaño y la posición de las imágenes de un objeto a través de una lente, sólo era un sencillo problema geométrico.

Una lente biconvexa de sección circular converge hasta un punto llamado foco los rayos que inciden paralelos al eje siempre que el haz sea bastante estrecho, pero si se ensancha, los externos convergen más cerca de la lente. Este fenómeno, *la refracción esférica*, que limitaba enormemente la eficacia de los telescopios y microscopios, fue corregido en teoría por Descartes diseñando lentes de sección elíptica aunque no las llegó a construir por la dificultad de su mecanizado. Hoy día, las lentes corregidas, conocidas como *asféricas*, se construyen normalmente.

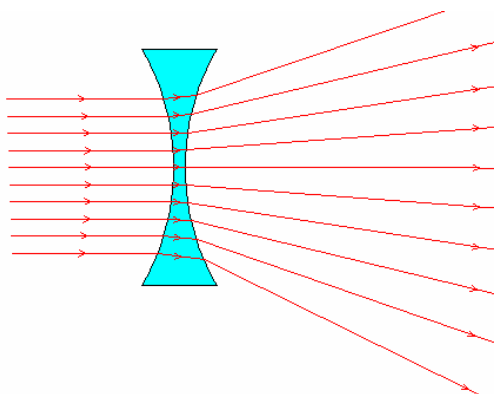


fig. 2.15 Lente divergente

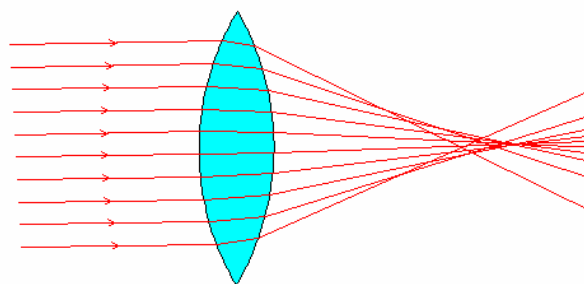


fig . 2.16 Lente Convergente

Si la lente era bicóncava, el haz de rayos paralelos abría su trayectoria, de modo que eran ahora sus trayectorias las que convergían, aproximadamente, en un foco.

El arco iris de Descartes

Así como las teorías físicas de la luz de Descartes fueron chapuzeras y contradictorias, no sucedió lo mismo con sus contribuciones a la óptica geométrica y a la visión. Descartes realizó avances espectaculares en el diseño de telescopios y microscopios y en el estudio de las anomalías oculares, observó la aberración esférica en las lentes y espejos, y propuso otros de sección parabólica o hiperbólica para minimizarlas pero no logra tallarlas.

Desde los tiempos de Aristóteles, la explicación de la forma y color del arco iris ha sido una constante en los trabajos de los filósofos de la Naturaleza. La presencia de dos arcoirises, el primario y secundario, con la secuencia de los colores invertida, el hecho de que la zona entre ambos fuera mucho más oscura (zona de Alejandro), que el resto del cielo, y la aparición de tenues arcos verdes y azules (supernumerarios) debajo del primario, habían provocado explicaciones las más de las veces erróneas entre las que destacaremos a Teodorico de Friburgo, Maurolico y Marco Antonio de Dominis.

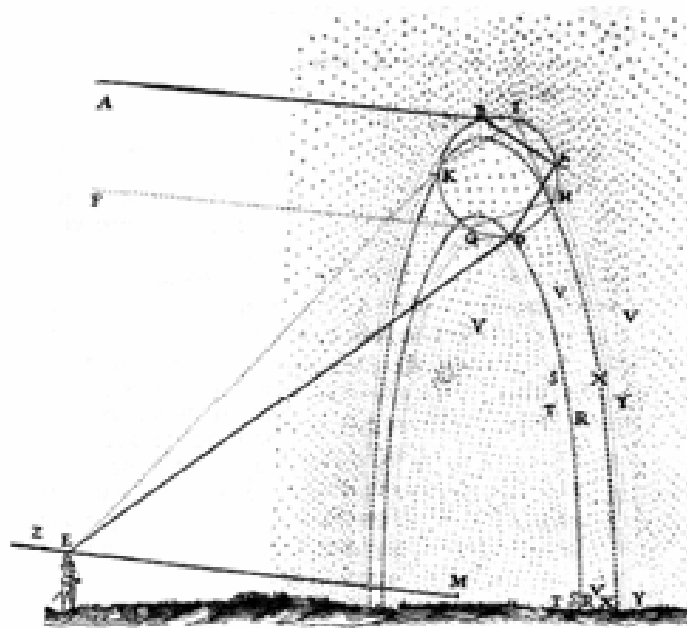


fig . 2.17 El arcoiris según Descartes

Original o no en su ley de la refracción, lo cierto es que Descartes logró el mayor conocimiento de su época en la Óptica Geométrica, lo que unido a su vocación experimental, le permitió proponer el mejor tratamiento conocido del arco iris. En principio, su metodología de investigación es correcta.

Como hicieron Bacon y Grosseteste, suspendió un matraz esférico lleno de agua a una cierta altura del suelo y lo iluminó desde su parte posterior con la luz solar. A fin de tener mayor control de los ángulos de iluminación oscureció el matraz a excepción de los puntos por los que entra y sale el rayo. El arco iris primario se consigue cuando un rayo horizontal incide en el matraz, se refracta una vez, se refleja en el interior, y se refracta de nuevo hacia el aire en una dirección tal que las prolongaciones de los rayos forman un ángulo de unos 42° . El arco iris secundario se consigue cuando el rayo incidente incide horizontalmente en el hemisferio inferior, formando ahora un ángulo de unos 51° con el incidente. Variando ligeramente la altura de la observación, aparecían unos colores y desaparecían otros. Un sencillo esquema ilustra bien la marcha de un rayo de sol horizontal que llega desde la derecha en la posición óptima.

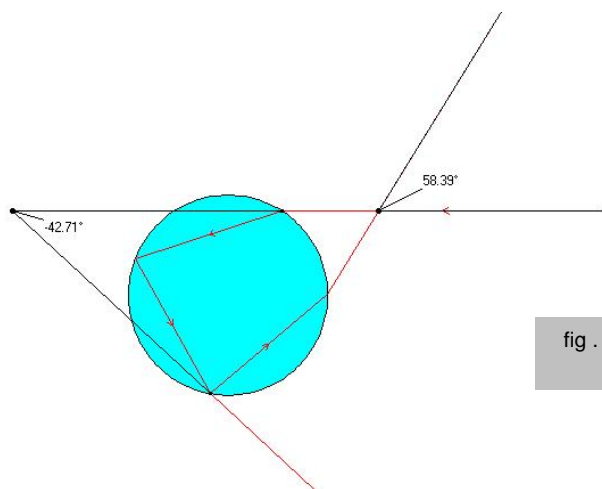


fig . 2.18 Marcha de un rayo luminoso a través de la gota de agua

El mérito de Descartes fue el aplicar las matemáticas al estudio del fenómeno. Dibujó para ello una esfera supuesta llena de agua, con un índice de refracción $n = 1,33$ sobre la que incidían rayos de luz paralelos al diámetro vertical a distintas distancias.

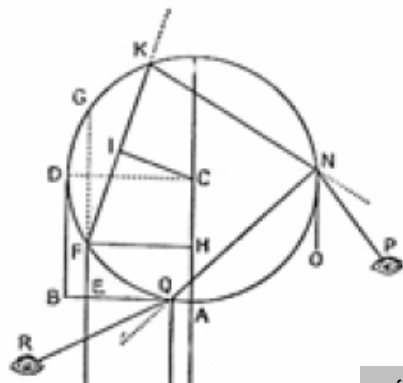


fig . 2.19 Dibujo original de Descartes

Podemos resumir sus experiencias: si se hace incidir un rayo FG paralelamente al radio AC de modo que se hace variar la distancia FH entre un valor de 0 y 10.000 a voluntad, puedo analizar el comportamiento de una infinidad de rayos emergentes en los puntos N y Q. Se calcula la trayectoria interna de cada rayo aplicando la ley de Snell como la relación ya demostrada por él, $HF/CI = \sin i / \sin r$ y se comprueba que en las proximidades de una cierta distancia FH, una gran cantidad de los rayos que salen de la gota de agua, lo hacen formando un ángulo ONP cercano a los 42° . Esto explica que observando según dicho ángulo, la gran cantidad de rayos de determinado color que nos llega, veamos el color correspondiente.

En su obra '*Los Meteoros*', explica el procedimiento e ilustra los resultados en una tabla numérica.

..Teniendo pues las dos líneas HF y CI conozco fácilmente los dos arcos FG que es de 73 grados y 44 mn y FK que es de 106,30. Seguidamente, tomando el doble del arco FK del arco FG añadido a 180 grados, esto es medio

círculo, obtengo 40,44 como la medida del ángulo ONP, ya que supongo que ON es paralelo a EF. Asimismo, restando estos 40,44 de FK obtengo 65,46 para el ángulo SQR pues también supongo que SQ es paralelo a EF. Calculando de igual modo todos los rayos paralelos a EF, que pasan por las divisiones del diámetro AB, compongo la siguiente tabla (Descartes, 1981)

El siguiente párrafo nos informa del minucioso trabajo que ello le supuso:

...Tomé mi lápiz e hice cálculos precisos de los caminos de los rayos que caen en los diferentes puntos de un globo de agua para determinar a qué ángulos, después de dos refracciones, y una o dos reflexiones, llegarían al ojo, y encontré que tras una reflexión y dos refracciones hay muchos más rayos que pueden ser vistos en un ángulo comprendido entre los 41 y 42 grados que en otro ángulo menor; y que no hay ninguno que pueda ser visto según un ángulo mayor.

LINEA HF	LINEA CI	ARCO FG	ARCO NFK	ANGULO ONP	ANGULO SQR
1000	748	168,30	171,25	5,40	165,45
2000	1496	156,55	162,48	11,19	151,29
3000	2244	145,4	154,4	17,56	136,8
4000	2992	132,50	145,10	22,30	122,4
8000	5984	73,44	106,30	40,44	65,46
8100	6058	71,48	105,25	40,58	64,37
8200	6133	69,50	104,20	41,10	63,10
8300	6208	67,48	103,14	41,20	62,54
8400	6283	65,44	102,9	41,26	61,43
8500	6358	63,34	101,2	41,30	60,32
8600	6432	61,22	99,56	41,30	58,26
8700	6507	59,4	98,48	41,28	57,20
9200	6881	46,08	93,02	40,04	52,58
9300	6966	43,08	91,51	39,26	52,25
9400	7031	39,54	90,38	38,38	52,00
9500	7106	36,24	89,26	37,32	51,54
9600	7180	32,30	88,12	36,06	52,06
9700	7255	28,08	86,58	34,12	52,46

Fácil es comprobar en esta tabla que es mucho mayor el número de los rayos que forman el ángulo ONP aproximadamente de 40 grados, que el de los que lo forman menor.; también, es mayor el número de los que forman SQR aproximadamente e 54 grados que el de los que lo forman mayor.

La curva que resume los resultados de la tabla ilustra muy bien las conclusiones. Si bien este trabajo supuso un éxito, los errores de Descartes en la interpretación del origen de los colores, como consecuencia de la interacción de la luz blanca con los bordes de los obstáculos, le llevan de nuevo a graves errores en la explicación de porqué aparecen los colores en este meteoro. No merece la pena extenderse, pero sí reseñar que los obstáculos necesarios para que aparezcan, se producen para él en las zonas de sombra, *la zona oscura de Alejandro*, ya referidas, con lo cual dice que ha explicado totalmente todo el fenómeno. Dejemos una espera de algunas decenas de años hasta las explicaciones de Newton...



El principio del tiempo mínimo de Fermat

Tras la publicación de su '*Dioptrique*', Descartes invitó a su discusión a los eruditos de la época como Mersenne, Morin, Peckan y Fermat y las reinas Isabel de Holanda y Cristina de Suecia, con los que entabla una larga correspondencia sobre temas matemáticos, científicos y filosóficos, que se recogen en cinco tomos recopilados por su seguidor Clerselier (Descartes, 1996). Fermat, el matemático más prestigioso de Francia, de aquél siglo, presentó algunas objeciones de peso a la propuesta de su contemporáneo, por ejemplo: ¿por qué no sufre modificación la componente horizontal de la velocidad al cambiar de medio? ¿Por qué un medio más compacto ofrece menos resistencia al paso de la luz? Parecería depender del ángulo de incidencia y que el valor de la velocidad debía disminuir.

Las explicaciones de Descartes carecían de un rigor mínimo a pesar de sus alusiones a la búsqueda de verdades ciertas para la construcción de sus modelos por lo que Fermat decidió elaborar su propia propuesta.

Recogiendo la herencia de Heron que defendía un principio de economía en las acciones de la Naturaleza ("*Lex Parsomoniae*"), como que el rayo incidente en un espejo y el reflejado elegían de entre todas las trayectorias posibles aquélla en la que invertían el menor tiempo, Fermat propuso

su famoso principio que enuncia el hecho de que cuando un rayo parte de un punto A, llega a la superficie de un nuevo medio y se refracta a un nuevo punto C, de entre todas las trayectorias posibles, elige aquella en la que invierte menos tiempo. Es decir, de entre todas las trayectorias posibles para ir desde A hasta B, sumados los tiempos que invierte en atravesar el aire y el invertido en atravesar el agua, se elige aquella en la que el tiempo es menor. Es como si el rayo tuviera conocimiento previo de esta condición y actuase en consecuencia.

Para su demostración, Fermat ignora la relación de Snell y parte de que la velocidad en el medio menos denso (aire) es mayor que en el más denso (agua) y a partir de ahí hace un desarrollo largo aplicando la condición de mínimo con un algoritmo que inicia ya el cálculo de derivadas, al camino óptico en un medio (distancia equivalente recorrida por la luz en el aire, en el mismo tiempo que en el medio) respecto del tiempo. Treinta años después, el holandés Huygens (1692) da una demostración geométrica, que merece la pena recuperar por su elegancia:

El rayo que sale del punto A en dirección a B, lo puede hacer, por ejemplo por tres trayectorias diferentes: ABC, AFC y AKC. La clave de la demostración es comprobar que los tiempos invertidos por los rayos AKC y AFC son mayores que el ABC. A tal fin, comparemos por ejemplo los distintos tiempos invertidos por el rayo virtual AFC y el real ABC.

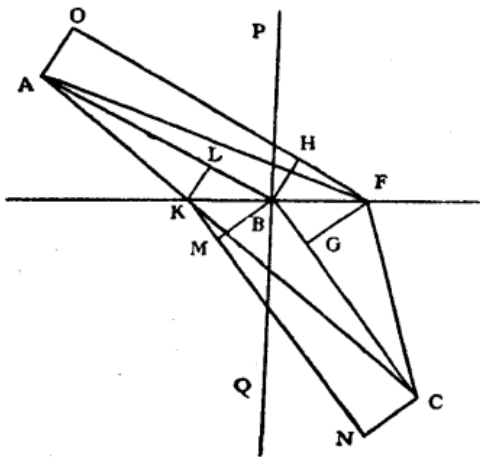


fig. 2.20 Gráfico de la refracción según Huygens

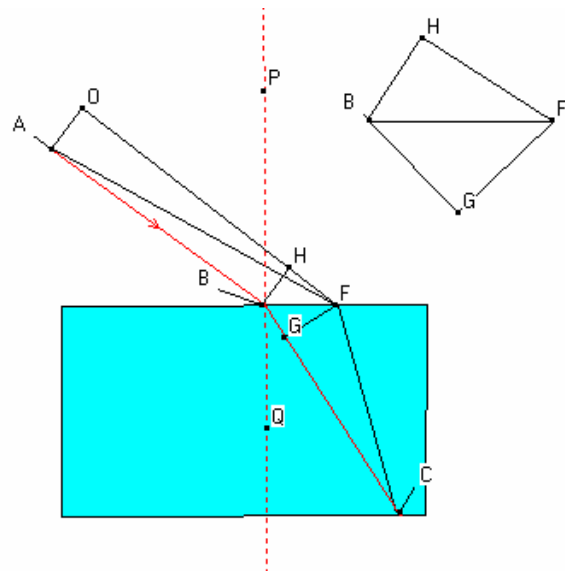


fig. 2.21 Detalle

Veámoslo para el rayo real ABC y uno de los caminos virtuales, el OFC:

Supuesto que el rayo que sale del punto A en un medio como el aire, y llega a otro más denso, pretendemos demostrar que entre las trayectorias ABC y la AFC elige la primera.

Por construcción OA y HB son perpendiculares a AB, y OF es paralelo a AB.

Los ángulos HBF y PBA son iguales (lados perpendiculares dos a dos). BFG y QBC también lo son por la misma propiedad.

En los triángulos HBF y BFG se verifica:

$$\text{sen HBF} = \text{HF/BF}$$

$$\text{sen BFG} = \text{BG/BF}$$

pero el cociente HF/BG es igual a la relación de velocidades v_1/v_2 , de donde resulta que los tiempos invertidos en los recorridos HF y BG serán los mismos.

El tiempo por AB y OH son los mismos. El tiempo por OF es igual al tiempo por AB, BG.

Del análisis del gráfico, el tiempo por FC es mayor que por CG, luego el tiempo por OFC será mayor que por ABC. Pero de las diferentes longitudes, el tiempo por AF es mayor que por OF.

De donde se deduce que el tiempo por AFC (camino virtual) será mayor que por ABC (camino real)

La demostración de que el tiempo invertido en la otra trayectoria virtual AKC también es mayor, es idéntica, por lo que puede quedar como un ejercicio para el lector.

Este principio permite reiniciar toda la Óptica pues la ley de Snell se puede demostrar desde él.

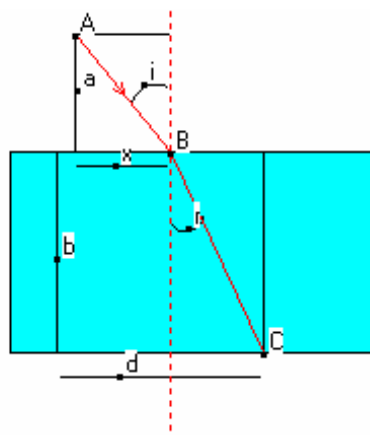


fig . 2.22 Tiempo mínimo en la refracción

En efecto: si t es el tiempo invertido en el intervalo ABC, minimizándolo respecto a la variable x , resulta :

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v_2}$$
$$\frac{dt}{dx} = -\frac{x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{(d-x)}{v_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\text{sen } i}{v_1} - \frac{\text{sen } r}{v_2} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{\text{sen } i}{v_1} = \frac{\text{sen } r}{v_2} \Rightarrow$$

si

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \therefore \therefore n_2 = \frac{c}{v_2}$$

de donde

$$\boxed{n_1 \text{sen } i = n_2 \text{sen } r}$$

que vuelve a ser la ley de Snell (n_1 , n_2 son los índices de refracción de los medios 1 y 2, c es la velocidad de la luz en el vacío) .

Tal afirmación les pareció un sinsentido a los científicos de la época, que lo miraban como un artificio matemático más que una descripción de la naturaleza, pero funcionaba. En 1662 Su contemporáneo Clerselier, experto en Óptica y defensor de las tesis de Descartes(Fermat, 1891) le rebatía diciendo:

...El principio que usted toma como base para su demostración, a saber, que la naturaleza siempre actúa según el camino más corto, sólo es un principio moral, no físico y no puede ser la causa de ningún efecto en la naturaleza.

Este sencillo principio merece una reseña especial en el contexto de la física. Parece como si el rayo tuviera inteligencia propia que le hace estudiar previamente un sinfín de caminos, y después seleccionar el de tiempo más corto...

Esta intencionalidad sería absurda, pero el hecho está ahí. Benjamín Cromwell (2000), hace un análisis muy interesante de cómo las trayectorias inmediatas a la real son aquellas cuya interferencia en el punto correcto, sería constructiva. De hecho Richard Feynman lo recuerda como una referencia en sus inicios a la Física, y más tarde le dedicó un análisis desde la perspectiva de que la trayectoria seguida por los fotones es aquella de máxima probabilidad de entre todas las posibles. Pero no es un caso aislado, sino un caso particular del principio de mínima acción que incluye también la trayectoria de masas en campos de fuerzas (Feynman, 1988).

Como veremos, Newton se hace una pregunta más profunda poco después y atribuye el cambio de trayectoria a una atracción entre átomos de materia y corpúsculos de luz...

5.2.3 El atomismo y los Experimentum Crucis

A lo largo de la Edad Media, la filosofía atomista sólo fue conocida por las discusiones entre los aristotélicos de las universidades, pero la llegada del Renacimiento trajo un renovado interés por la moral, arte y estética de los clásicos que supuso una búsqueda de manuscritos antiguos en los monasterios y traducciones procedentes de Toledo e Italia.

Para el desarrollo de la ciencia occidental, fue relevante la figura del erudito italiano Poggio Bracciolini (1380–1459) que era el típico humanista del Renacimiento en un tiempo en que las curias papales y las vidas monacales atravesaban climas oscuros: seglar, hombre de leyes, copista y traductor de manuscritos de los clásicos, amante de su ética y estética, es nombrado secretario apostólico de la curia romana que trabajó en el concilio de Constanza. Durante su estancia en esta ciudad, tuvo ocasión de consultar las bibliotecas de los monasterios suizos, franceses y alemanes, donde encontró y tradujo en 1417, entre otros, el manuscrito '*De Rerum Natura*', original de Lucrecio, el poeta romano que recogió las ideas atomistas de Demócrito.

El sacerdote italiano, Pierre Gassendi, conocedor de su obra, retomó sus ideas en un intento de sustituir la teoría de la materia continua de Aristóteles opuesta al vacío como un no-ser, y confirmada por la experiencia, de que los cuerpos son frenados en su movimiento, por un atomismo conforme con la doctrina cristiana: los átomos eternos, móviles entre espacios huecos y de distinto tamaño, podían explicar los cambios observados en la naturaleza, como nuevas uniones de estos átomos eternos



e indivisibles. Para él, era posible reconciliar las teorías de los cambios de Parménides con la inmutabilidad de la materia y con la religión católica. Aunque no destacó por sus contribuciones científicas, se erigió en coordinador respetado de una nueva escuela, de modo que sus ideas atomistas aplicadas a la constitución de la materia y la luz, integrarán el núcleo de las teorías de Boyle y Newton.

Frente a estas nuevas informaciones, la respuesta de la comunidad científica no fue unívoca: mientras Galileo adoptó sin reservas el nuevo atomismo, Descartes prefería un "*plenum*" continuo con las tres clases de materia ya enunciadas y una metodología deductiva a partir de unos supuestos ciertos. De mientras, aunque la refinada Europa continental veía a Inglaterra como un pueblo desconocido y semi-bárbaro, algo empezaba a moverse allí con fuerza: aparece Francis Bacon, el ideólogo de la metodología científica de los nuevos tiempos, que publica su '*Novum Organum*' (1620) como respuesta al '*Organum*' de Aristóteles, que acuña el nuevo término "*instantia crucis*" (caso crucial) como la situación en la que se plantea una decisión entre dos opciones en principio igualmente válidas, y el "*Experimentum Crucis*" como la experiencia que

arbitra la disyuntiva definitiva (Duhem, 1914). No hizo aportaciones importantes pero propuso una metodología en la que la relevancia del experimento controlado fundó escuela. A partir de esta expresión, los ingleses Robert Boyle, Robert Hooke e Isaac Newton, la utilizaron como eje de investigación.

Aunque en fechas recientes, la epistemología de la ciencia ha relativizado la importancia de los experimentos, lo cierto es que esta visión y sus métodos, supusieron un nuevo impulso para la ciencia. La aparición de las sociedades científicas en las cortes europeas, al margen de las universidades, creó un nuevo clima que se demostró más fructífero que éstas. En Inglaterra, la Royal Society, sin contar con subvención oficial, estableció como norma que sus reuniones semanales a las que asistían científicos, intelectuales, obispos, gentilhombres, lores,...debían incluir al menos dos o tres sesiones experimentales para lo que se creó el puesto de “*Curator of Experiments*” (encargado de experimentos).

En lo concerniente a la óptica aparecieron novedades cuya interpretación, considerando la luz como rayos lineales homogéneos, se mostraba insuficiente.

Fermat y Descartes habían llegado a un conflicto irresoluble en el valor de la velocidad de la luz en medios distintos. Finita para el primero e infinita para el segundo, las dos teorías eran igualmente poderosas para explicar los fenómenos de refracción y reflexión y para construir ingenios ópticos.

Fue necesario que la ciencia inglesa, provista de esta nueva metodología experimental, un cálculo matemático que crecía a marchas forzadas, un clima social muy favorable, y unos personajes de excepción provistos de sus herencias culturales, comenzaran a inventar los tópicos de la óptica física, investigando las propiedades de la luz, del color y sus causas físicas. Su figura más relevante, Isaac Newton, necesitó apoyarse en *hombros de gigantes* como Hooke o Boyle, según su propia expresión, en una epístola al primero. A partir de las medidas indirectas de la velocidad de la luz del astrónomo Römer y de su asombrosa capacidad experimental, revolucionaría el espacio de la ciencia europea con su teoría de *emisión* de la luz. Sólo el holandés Huygens, su contrincante más respetado, fue capaz de ofrecer una teoría alternativa de la luz, la *Teoría de los medios*, como se llamó por entonces.

Robert Boyle (1627-1691)

En sus trabajos sobre el aire elástico y el vacío, admitía la existencia de partículas discontinuas que se mueven entre espacios vacíos. Sus distintos distanciamientos, explican los cambios de volumen y presión observados.

Su libro sobre la luz y el color, '*Experiments and Considerations Touching Colours*' (1644) busca más una relación entre la estructura de los cuerpos y su influencia en los colores que presentan, que un análisis de la luz blanca. Está alimentado de la filosofía mecanicista y corpuscular lo que lleva a considerar la luz como una nube de partículas.



Supone que las partículas superficiales de la materia tienen una disposición para alterar la luz blanca. La interacción da lugar a una mezcla de luces y sombras que llega a la vista. Otras alteraciones pueden también producir color, como son el orden de llegada, la velocidad de las partículas, etc... Se centra en los colores blanco y negro. El blanco sería debido a una alteración de la superficie de los cuerpos que da por resultado infinidad de pequeñas superficies reflectantes que reflejan la luz hacia los ojos del espectador.

Su mérito es elaborar una colección de experimentos disponibles para que ulteriores generaciones los pudieran explicar, y así lo reconoce. Sigue la tradición aristotélica en la concepción de la luz: el blanco y el negro son reflexiones de la luz con más o menos sombra. No hay ninguna cuantización del fenómeno, solo adjetivos.

Francesco Maria Grimaldi (1618-1663)

Erudito jesuita en la Universidad de Bolonia, destaca por sus muy precisos experimentos con la luz. Sus trabajos aparecen en una obra de dos tomos '*Physicomathesis de lumine, coloribus et iride* ' publicado en 1665. Organiza su trabajo a partir del eje ¿sustancia o accidente?. En el primer libro dice que la repetición de las viejas fórmulas, no es el camino para tratar con las nuevas experiencias y sostiene la sustancialidad de la luz.



En el segundo lo rechaza y sostiene la vista peripatética opuesta. (la luz como accidente). Su carácter conciliador y apacible así como su respeto a la jerarquía, le hacen erigirse en moderador de ambas propuestas sin definirse por ninguna. Asigna propiedades ondulatorias a este fenómeno:

...La luz es un fluido extremadamente sutil, susceptible de ondulación, que se mueve con velocidad considerable aunque no infinita a través de los cuerpos transparentes.

Propone que puesto que como hay tres mecanismos para la producción de los colores, reflexión, refracción y difracción, el color debe ser una propiedad del factor común a las tres experiencias, la luz. Asimismo, el que la aparición de color en los prismas sea independiente del material, avala su teoría de la independencia respecto del mismo. Los colores serían modificaciones de la luz, cambios en la tensión, enrarecimientos o compactaciones de estas ondas de luz-fluido. Hay tres colores simples: rojo, amarillo y azul. Los colores son ondas de luz distintas. Rechaza la diferencia entre colores reales y aparentes de los objetos.

A pesar de sus teorías erróneas, herederas de Descartes, lo más importante de Grimaldi fue el descubrimiento de la difracción de la luz en 1660 a partir del estudio de las sombras que un rayo de sol procedente de un pequeño orificio practicado en una contraventana proyectaba en una pantalla frente a la que se interponían pequeños obstáculos. La explica como si la luz fuera un fluido con los corpúsculos giratorios de Descartes y la materia tuviera poros.

La síntesis de sus experiencias viene indicada en las figuras adjuntas.

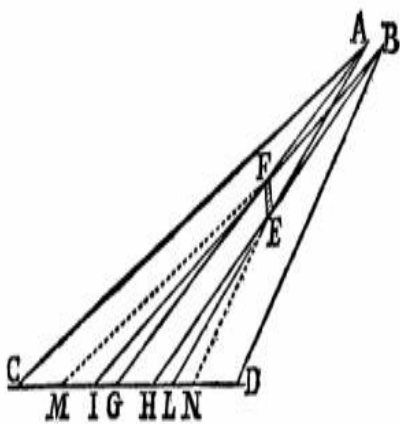


fig. 2.23 La difracción según Grimaldi



fig. 2.24 Montaje original de Grimaldi

Sean A y B son los extremos de una pequeña rendija practicada en una persiana de madera de una habitación oscura por la que entra la luz solar hasta una pantalla CD situada en el suelo. FE es un pequeño objeto opaco que interrumpe el haz de luz solar. Sin obstáculo se verán dos conos ACL y BID.

Con obstáculo, debía verse una sombra GL y otra IH, habría una zona sombreada IL y la zona GH en perfecta oscuridad, pero sorprendentemente, IL se ensanchaba hasta MN y aparecían regiones coloreadas paralelamente.

Además, en las zonas brillantemente iluminadas CM y ND hay bandas de luz coloreada, de modo que el centro de cada una es de color blanco, mientras que en los límites hay color, siempre azul en la más próxima a MN y roja en la más lejana. Estas bandas dependen del tamaño de la rendija AB, y no aparecen si es demasiado ancha.

Es decir que la luz era capaz de desviarse de la línea recta al encontrar obstáculos en su camino, y que *las sombras eran coloreadas en los bordes* (Grimaldi, 1665).

El Experimentum Crucis de Robert Hooke

Es una figura que tuvo la mala fortuna de ser contemporáneo de Isaac Newton, que le eclipsó. Falto de su preparación matemática y dotado de un carácter irascible, trabajó como arquitecto en la reconstrucción de Londres tras su incendio. Poseía una prodigiosa habilidad manual, dotes artísticas, y una intuición nada común sobre el origen de los fenómenos físicos. A las órdenes de Robert Boyle construyó la famosa bomba de vacío, base de las experiencias que dieron lugar a la teoría de los gases y las propiedades del supuesto del éter (Conan, 1957).



Lo que nos interesa destacar aquí, es que tras el diseño y la construcción de un magnífico microscopio compuesto, sus observaciones dieron lugar a la obra '*Micrographia*' (Hooke, 1665), en la que además de plasmar dibujos de minerales, plantas e insectos, con detalles hasta entonces desconocidos, dedicó un extenso apartado a proponer un modelo de la luz que explicaba la formación de colores virtuales en las plumas de los pájaros, pompas de jabón y en las delgadas láminas de mica.

Para él, la luz, a la que asigna una velocidad finita, se produce a consecuencia de movimientos muy rápidos y periódicos (aunque no lo explicita) de las partículas en los cuerpos brillantes como el fuego, o los diamantes frotados en la oscuridad. Los focos de luz emiten perturbaciones esféricas periódicas a la manera de las producidas en una superficie de agua sobre la que se lanza una piedra. La luz sale de los objetos totalmente blanca, pero se modifica en su interacción con la materia y se producen los colores. Ya habla de densidad óptica de los medios (no gravitacional).

Es muy crítico con las afirmaciones de Descartes acerca del color y las desarma sistemáticamente en su texto. Sin embargo sus propuestas también tienen lagunas pues defiende dos teorías distintas del color según que el rayo sufra una única refracción, o que sufra la interacción refractiva y reflexiva de las láminas delgadas plano-paralelas.

Define el rayo físico como una entidad ADFC compuesta de rayos geométricos como ABC y DEF. Aunque no explicita que exista periodicidad en los pulsos, sus gráficos se aproximan mejor que nadie hasta entonces a la teoría ondulatoria de Young, cien años posterior. Propone que el rayo geométrico ABC de un determinado pulso CF que llega antes a la superficie, penetra con más facilidad en el intervalo CH, recorriendo más espacio que su homólogo FG.

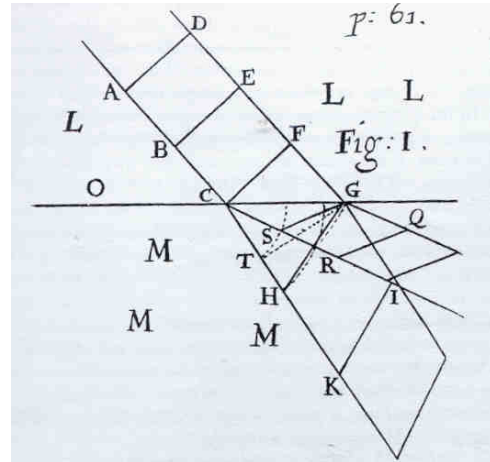


fig . 2.25

Del mismo modo, cuando la luz pasa de un medio *más fácil* a otro *más difícil*, su trayectoria se cerrará. En nuestro gráfico el rayo físico procedente ahora del segundo medio, se cierra según CADF. Sea ACFD un rayo físico, AC y FD rayos matemáticos. El rayo se hace oblicuo al refractar.

Esta teoría de la oblicuidad se puede aplicar también al prisma y al vaso de agua. En el caso de un foco de luz extenso como el sol, que llega a una superficie refringente, sean CDBA y EFBA los rayos procedentes de los distintos extremos del sol.

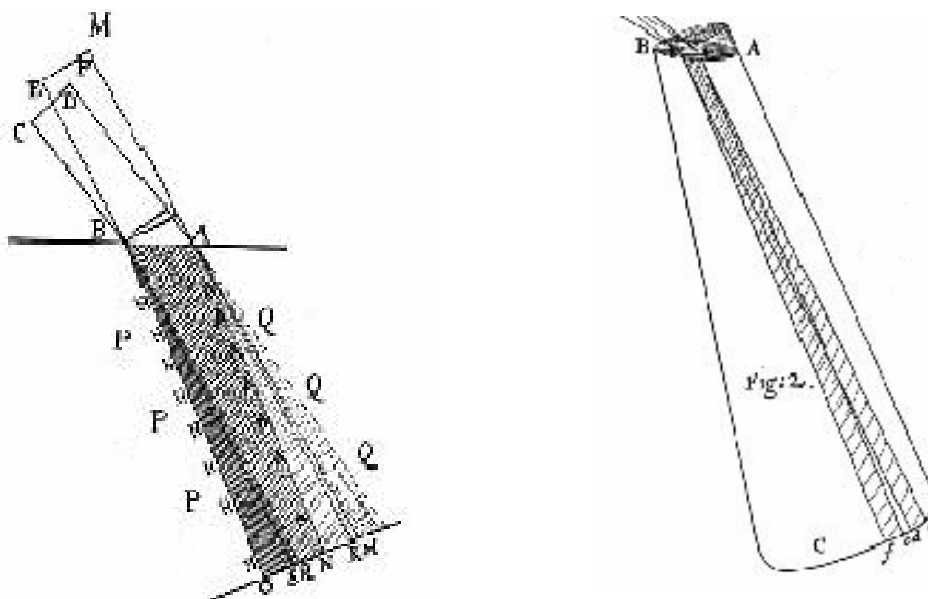


fig .2.26 Dibujos autógrafos de Hooke sobre la refracción en su obra *Micrographia*

El de la derecha EFBA, al refractarse y hacerse oblicuo AAHB, encuentra su parte más avanzada con una zona de sombra, luego ésta parte HHHH se debilita progresivamente. O sea que la parte

más adelantada del pulso oblicuo, que encuentra la sombra se debilita y el resultado es que el rayo físico toma un color azul en la zona RBHO más oscuro cuanto más próximo de BO. Por la misma razón en el otro rayo MAN debilita su frente más retrasado por ser éste el que encuentra la zona de sombra QQQ. Por tanto tomará un color rojo, tanto más intenso cuanto más se aproxime a la línea MA. En palabras de Hooke:

...Luz azul es una sensación de pulso confuso, más débil por su parte precedente y la roja una sensación de pulso confuso más fuerte por su parte precedente (Hooke, 1665).

El de la izquierda CDBA encuentra la sombra por la parte más retrasada Sin embargo veamos cómo cambia su teoría del color para explicar su “*Experimentum Crucis*”, la aparición de color en las pompas de jabón o en delgadas láminas de mica, cuando la luz blanca se refleja y refracta en ellas.

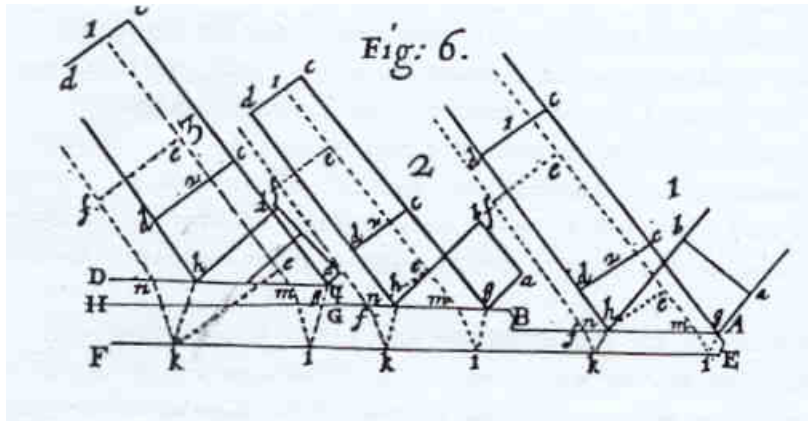


fig . 2.27 Frentes cuasi-ondulatorios para Hooke

Tras la observación de delgadas láminas de mica con su microscopio, observó que si el espesor de las mismas era uniforme, sólo se observaba un determinado color, pero si existían distintos espesores, se apreciaban otros distintos. La figura 6 del esquema VI de su texto, analiza la situación del rayo (1) , que atraviesa un espesor pequeño, y, a continuación, la de los rayos (2) y (3) que recorren mayor camino (Blay, 1983)

Veamos lo que sucede con el trozo de espesor menor con lo que la explicación puede extrapolarse a los otros BG y GD:

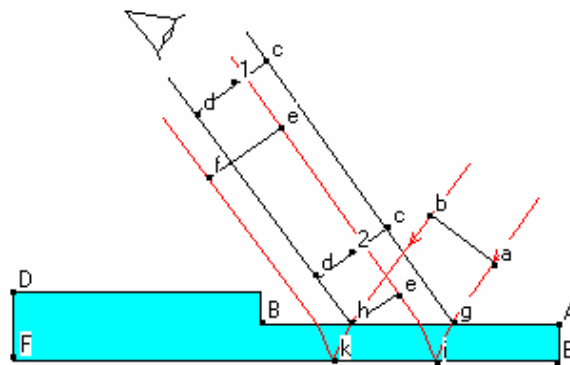


fig. 2.28 Detalle del dibujo de Hooke

Sea el rayo **gahb** procedente del sol que llega oblicuamente a la lámina BAE. Una parte se refleja según **cghd** manteniendo constante la distancia entre pulsos inicial., de manera que **ag+gc** vale lo mismo que **bh+hd**. Otra parte se refracta según **gihk** hacia EF, de donde se refleja y refracta de nuevo en BA. Tras dos refracciones y una reflexión, se produce un rayo más debilitado **emnf**, que además, produce pulsos retrasados respecto al **cd**. En esta situación en la que el rayo más fuerte precede al más débil, la impresión conjunta de ambos en el nervio óptico o la retina, es de un color amarillo, mezcla de un frente fuerte y otro débil.

Al llegar otro rayo a la superficie BG, la distancia entre pulsos aumenta y la retina los compone como color rojo. En CD, la distancia entre pulsos crece tanto, que ahora parece como si el pulso débil precediera al fuerte. La consecuencia fisiológica, es una percepción del color azul.

Como vemos, los dos mecanismos son del todo independientes, siendo la clave del color, la sensación en la retina, idéntica en ambos casos, sin precisar ninguna cuantificación de fuerza, debilidad, diferencia de caminos entre frentes. Podría parecer que Hooke hubiera intuido el mecanismo de las interferencias de Young, pero no es así en absoluto. En el universo de Hooke sólo hay pulsos fuertes y débiles sin cuantificar, secuenciados distintas distancias, y son las sensaciones las que interpretan el color. Con todo, su teoría y experiencias, son la referencia más avanzada que encuentra el joven Newton cuando comienza sus trabajos...

Ole Römer (1644 -1710), no calcula la velocidad de la luz

Fue un astrónomo danés que Luis XIV llamó a trabajar al recién creado Real Observatorio Astronómico de París. Su personalidad es asombrosa: de regreso a Dinamarca en 1681 tras la revocación en Francia del Edicto de Nantes que anulaba la permisividad hacia los protestantes, regresa a su país donde es nombrado Astrónomo Real, Director de la Casa de la Moneda, Alcalde de Copenhague, Prefecto de Policía, Senador y Jefe del Consejo de Estado.

Durante su estancia en París, los astrónomos del Observatorio centraron su atención en la medida de los períodos de revolución de los satélites de Júpiter, que resultaban ser de duraciones alternativamente creciente y decreciente. El número cuatrocientos es aquí una cifra clave pues es la duración al cabo de la cual, la Tierra se aproxima más a Júpiter. El Director del Observatorio, Jean-Dominique Cassini, intuyó la posible relación entre este comportamiento y el giro de la Tierra, pero la influencia de Descartes y la imprecisión de las observaciones, le hicieron desechar la idea, no así al brillante “*postdoc*” Römer, que publica entonces sus resultados trascendentales (Römer, 1676).

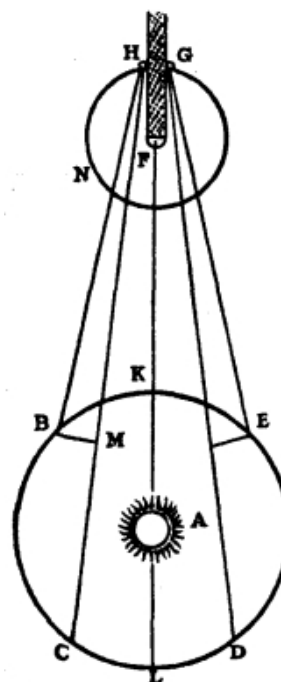


fig . 2.29 La velocidad de la luz desde Júpiter a la Tierra es finita

Parece evidente que el período de los satélites debía ser constante y que la observación de éste fenómeno, debe tomar un tiempo desde esa distancia tan lejana. Dado que el giro de la Tierra alrededor del Sol es mucho más rápido que el de Júpiter, la distancias Tierra-Júpiter variarían de modo uniforme y con ellas, las medidas de los períodos.

Veamos su discurso tal como lo relata *Huygens* (1690) dos años más tarde a partir del gráfico adjunto: Sean G y H las posiciones del satélite *Io* inmediatamente antes y después de su eclipse y EKBCLD las distintas posiciones de la órbita de la TF.

Supongamos que la Tierra estando en B ve al satélite salir en H. Si no se moviera durante 30 revoluciones, lo vería de nuevo en la misma posición al cabo de 30 veces 42,5 h. Pero Si la Tierra se mueve hasta C, el pequeño planeta sería visto más tarde en C de lo que sería en B y a las 30 veces 42,5 h habría que añadir al tiempo el tiempo que tarda la luz en viajar de MC, el espacio diferencia entre CH y BH. La situación en el trayecto DE sería idéntica restando el mismo tiempo.

Los resultados de las observaciones durante los diez años consecutivos en los que se tuvo en cuenta el movimiento de Júpiter, dieron lugar al valor de aproximadamente once minutos para el tiempo

que la luz tarda en recorrer el radio Tierra-Sol, y veintidós para recorrer el diámetro de toda la órbita. A pesar de lo que aparece en la mayoría de las referencias, no hay constancia escrita de que Römer hubiera propuesto ningún valor concreto para la velocidad de la luz (Tunistra, 2004) aunque ello no resta un ápice de mérito a sus conclusiones: la obtención de un valor finito para la velocidad de la luz acababa de echar por tierra toda la teoría cartesiana. Aunque muy grande, el valor de su velocidad no era instantáneo, por lo que sus analogías del bastón de ciego o del cubo con uvas que transmiten instantáneamente la presión superior, dejaban de lado toda una etapa.

DEMONSTRATION TOUCHANT LE mouvement de la lumière trouvé par M. Römer de l'Académie Royale des Sciences.

IL y a long-temps que les Philosophes font en peine de décider par quelque expérience, si l'action de la lumière se porte dans un instant à quelque distance que ce soit, ou si elle demande du temps. Mr Römer de l'Académie Royale des Sciences s'est avisé d'un moyen tiré des observations du premier satellite de Jupiter, par lequel il démontre que pour une distance d'environ 3000 lieues, telle qu'est à peu près la grandeur du diamètre de la terre, la lumière n'a pas besoin d'un

1676.

N n n

DEMOSTRACION RELATIVA al movimiento de la luz encontrado por el Sr. Römer de la Academia Real de las Ciencias

Hace mucho tiempo que los filósofos están preocupados por decidir por alguna experiencia, si la acción de la luz se lleva en un instante a cualquier distancia que sea, o si lleva un tiempo. Al Sr. Römer, de la Academia Real de las Ciencias, se le ocurrió un modo (de resolver este problema) deducido de las observaciones del primer satélite de Júpiter, por el cual demuestra que para una distancia próxima a 3000 leguas, — tal como es, poco más o menos, la magnitud del diámetro de la Tierra — la luz no tiene necesidad de. [utilizar] un segundo de tiempo.... (1676)

fig. 2.30 Relato y traducción del descubrimiento de Römer.

Huygens aplica más tarde en su '*Traité de la Lumière*' su estimación de el diámetro de la órbita terrestre KL de 2282 "toises"¹ (24.000 diámetros terrestres, y puesto que el diámetro de la Tierra para él era de 2282 toises (12750 km), la luz haría 1000 diámetros en un minuto y 16 2/3 diámetros en un segundo, y como el sonido recorre 180 toises en 1 s, lo que haría un valor de 600.000 veces la velocidad del sonido, unos 232000 km/s, aunque él retocó los cálculos al valor 212000 km/s. Poco más tarde, el astrónomo inglés Edmund Halley, redondeó este valor a unos 300000 km/s.



¹ El toise era la medida de la longitud que abarcaban los brazos extendidos de una persona, unos seis pies reales de la época.

5.2.4 La óptica de Sir Isaac Newton

Si bien nadie haya discutido, desde su publicación en 1687, que los ‘*Principia Mathematica*’ de *Isaac Newton*(1642-1727) sean el libro más importante de la literatura científica mundial, (aunque muy pocos lo hayan conseguido leer en su totalidad con provecho) , no sucede así con su ‘ *Opticks*’ aparecido en 1704 del que se hacen en vida cuatro ediciones distintas e infinidad de traducciones .Está estructurado en tres libros en los que se exponen las experiencias y las propiedades inferidas como evidentes, seguidos de las “*queries*”, ampliadas en cada edición, que son cuestiones entreabiertas a hipótesis plausibles pero no suscritas explícitamente. Sus doctrinas dominaron la ciencia europea durante un siglo hasta su ocaso. Mientras que el primero, escrito en

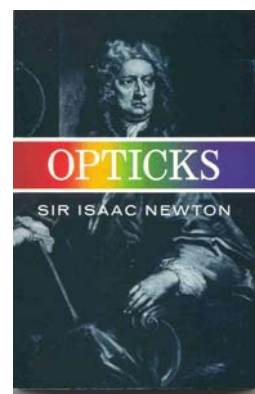


fig . 2.31

latín para iniciados, es un alarde de dominio de la geometría en el que se deducen leyes matemáticas de los comportamientos de los cuerpos celestes a partir de muy pocos supuestos, los tópicos de ‘*Opticks*’, a excepción de su tratamiento del arco iris, sólo necesitan un bagaje geométrico muy elemental. Son la continuación de las áridas lecciones que dió en Cambridge, tras hacerse cargo de la Cátedra Lucassiana que más tarde se publicaron como ‘*Lectiones Opticae* ’ (‘*Optical Lectures* ’ en su versión en inglés) y de sus cartas al secretario de la Royal Society, Oldenburg, en las que esbozaba sus teorías e hipótesis sobre la naturaleza de la luz.

‘*Opticks*’ está plagado de descripciones de experimentos que pretenden inducir propiedades de la luz para él indiscutibles, siguiendo escrupulosamente la metodología científica propuesta por Bacon con un lenguaje asequible en la mayoría de sus tratamientos, si se emplea una cierta atención adobada de lápiz y papel. No obstante adolece en varios pasajes de la claridad de expresión de cualquier texto actual que trate los mismos tópicos.

Un siglo después de su aparición, tras la superación de sus tesis por *Young* y *Fresnel*, su obra se consideró como un error, eso sí grandioso, cuyo único interés era el histórico. Sin embargo, su parte más oscura, la teoría de los *fits* como estados asociados a los corpúsculos constituyentes de los distintos colores que les conferían propiedades periódicas, desveló una cierta premonición de la dualidad onda-corpúsculo actuales como destacan los científicos Bernard Cohen , Albert Einstein y E.T. Witteraker en el prólogo de la última edición del libro (Newton,1731). Sus incomprensidos corpúsculos y *fits* están muy alejados de nuestros fotones y de su función de onda asociada pero conviene rescatarlos del olvido para demostrar que Newton llegó lo más lejos que se podía en su tiempo. Las divulgaciones que nos dejan incluso textos universitarios, cuando enfrentan su teoría corpuscular con la teoría ondulatoria de Huygens, son una simplificación grosera que hay que combatir. Es Newton quien descubre las propiedades periódicas de la luz, que atribuye a sus *fits*,

mientras que Huygens propone pulsos no periódicos producto de los impactos de los corpúsculos etéreos.

Sus orígenes

El genio de Newton, necesitó de unas ayudas, fuentes y referencias (Westfall, 1966) que le ayudaron a evitar la previsible mediocridad de un campesino acomodado de la campiña inglesa.

Nace sietemesino, con una salud extremadamente frágil, huérfano de padre, en el seno de una familia rural acomodada en la aldea de Woolsthorpe del condado de Lincolnshire. Las segundas nupcias de su madre con el Reverendo Barnabas, le dejaron relegado a vivir desde los tres a los once años en el campo con sus abuelos maternos. Esta carencia afectiva marcó su carácter para siempre como hosco, cruel con los criados, mordaz e introvertido. Su padrastro, hombre culto, deja a su muerte en 1653 una buena biblioteca con temas teológicos y algunos ejemplares de mecánica popular que desarrollan el gusto de Isaac por los temas religiosos y las habilidades manuales, como maquetas o relojes de sol. Es de suponer que ello le ayudó a enfocar los problemas experimentales desde una fértil autosuficiencia.



fig . 2.32 La casa natal de Woolsthorpe



fig . 2.33 La casa de su vejez en Londres en los años 1710-27

Una vez en la cercana Grammar School de Grantham, entre los doce y los diecinueve años, demuestra de nuevo su carácter huraño, sin integrarse ni con sus compañeros ni con su profesor. Consciente de su superioridad intelectual, en los últimos años de su estancia vivía en su propio mundo con el sólo interés por la cultura que le ofrecía esta institución, impresionando a su maestro Mr. Stoke con sus facultades. Adquiere allí una buena base en latín (lo que le servirá para dar a conocer su obra por toda Europa) y mala en ¡matemáticas!...

Comprobados, afortunadamente para el mundo, su ineptitud y desinterés para las labores agrícolas (decían de él los criados que *sólo servía para la Universidad*), y tras una interrupción de dos años en sus estudios, ingresa en el Trinity College de Cambridge en 1661 (ya tiene 19 años), como *subsiza*, la figura del alumno pobre que pagaba sus estudios sirviendo las mesas, arreglando las habitaciones y limpiando orinales de los alumnos *fellows* y pensionistas. Dada la holgada economía familiar, su superioridad intelectual y su retraso de dos años en la incorporación a la Universidad... ¿cuánto rencor no almacenaría contra su madre y sus compañeros?

En escritos posteriores recuerda sus sentimientos de culpabilidad y autodesprecio, sus autocastigos y su conducta escrupulosa y austera. Su único amigo, compañero de habitación, testifica su enfermiza afición por el estudio. que le hará leer a Euclides, Descartes, al atomista cristiano Pierre Gassendi, al filósofo John Hobbes, al matemático John Wallis (estudioso de la Matemática infinitesimal), a Galileo, al químico atomista Robert Boyle, o al filósofo neoplatónico cristiano Henry Moore, autores todos ellos marginales a los programas de una Universidad mediocre y enfermiza, anclada aún en la Escolástica. Desde la conciencia de su genio, Newton se sabe sólo y centra su atención en la búsqueda de la verdad.

Debemos asentir que sus intereses por la llamada “filosofía natural”, la matemática, unas firmes convicciones religiosas y una no asumida adscripción a las teorías atomistas, se forjan en estos años universitarios entre 1661 y 1664. Tras la consecución de una beca por tres años, se acentúa aún más su ritmo de trabajo que modifica el ritmo de sus sueños y comidas.

En 1665 es nombrado “Bachelor of Arts”, lo equivalente a una de nuestras licenciaturas. La aparición de la Peste Bubónica en Londres y Cambridge le obliga a refugiarse de ella en la casa paterna de Woolsthorpe entre las fechas de junio de 1665 y abril de 1667 con un regreso corto de tres meses a la Universidad. Se dice que el 1666 fue su *annus mirabilis*, y como contaría más tarde, nunca volvió a trabajar con la misma intensidad que en aquella época. Es entonces cuando inicia los fundamentos de gravitación, cálculo y naturaleza de la luz que más tarde asombraron al mundo. Con veinticinco años se convierte en el mejor matemático y filósofo natural de Europa.

Los supuestos científicos y metodológicos

Newton era un genio obsesionado por el rigor y la búsqueda de la verdad, y entender a un genio no es tarea fácil. La lectura de su obra debe tratarse luchando por la comprensión de unos términos cuya significación no coincide con la actual en ocasiones y con un esfuerzo de interpretar lo que es para él en cada caso una propiedad incontrovertible o una hipótesis sometida a revisión. Aún hoy impresiona su tesis de la existencia de una acción a distancia en un panorama científico donde el mecanicismo de acciones transmitidas por impactos o presiones entre pequeñas bolas, explicaba todos los fenómenos. Es interesante recordar el primer párrafo con el que inicia su ‘*Opticks*’:

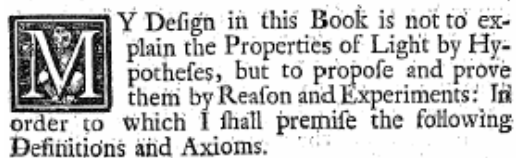


fig . 2.34 .Hipótesis non fingo en los Principia

...Mi deseo en este libro no es explicar las propiedades de la luz por hipótesis sino proponerlas y probarlas por la razón y los experimentos. Para ello, expondré las siguientes definiciones y axiomas.

En el “Scholium” del Final de los ‘Principia’, expone su famosa respuesta a las peticiones que le hacían acerca de su hipótesis de la naturaleza de las polémicas fuerzas atractivas a distancia:

*...Pero hasta ahora aún no he sido capaz de descubrir la causa de esas propiedades de la gravedad a partir de los fenómenos, y no imagino hipótesis (**Hypotesis non fingo**), porque cualquier cosa que no sea deducida de ellos se denomina hipótesis; y las hipótesis, ya sean metafísicas o físicas, ya tengan cualidades ocultas o mecánicas, no tienen lugar en la filosofía experimental. En esta filosofía, las proposiciones particulares se infieren de los fenómenos, y posteriormente se hacen generales por inducción.*

Newton inicia su dimensión pública a raíz de su famosa presentación de su teoría de los colores, tras la publicación en la *Philosophical Transactions*, la revista de actas de la *Royal Society*, de su famosa carta al secretario de la *Royal Society*, Oldenburg (Newton, 1672). Una semana más tarde, la máxima autoridad de Inglaterra en Óptica, Robert Hooke, opinaba paternalmente que de sus meritorias experiencias se podían deducir otras hipótesis tan válidas como las que él proponía. A partir de entonces se inicia entre ambos una intensa correspondencia que degenera en una relación enfrentada. Newton decide ser mucho más preciso en diferenciar entre *teoría* como una proposición cuya certeza no es evidente, de las observaciones, pero que puede ser deducida de ellas, e *hipótesis* que es algo sugerido, pero no requerido, a partir de los hechos experimentales. Las hipótesis ilustran sus principios a modo de pinturas mentales y ayudan a su comprensión, pero nunca las defiende como certezas. De hecho la estructura de ‘*Opticks*’ la construye como principios y cuestiones hipotéticas que llamó *queries*.

Newton no sólo hace ciencia sino que reformula la forma de construirla. Está en contra de las bizarras hipótesis como la de los vórtices de Descartes, que se establecen como conjeturas sin ninguna base experimental. La búsqueda de la certeza científica debe hacerse para él, a través de la experiencia y de las matemáticas. La ciencia puede contentarse con explicar el mecanismo matemático de los modelos aunque no describa la naturaleza profunda del fenómeno. Sí tienen cabida las *hipótesis* con alguna evidencia experimental pero insuficiente para establecer su certeza, que él entiende como *teorías*, porque ayudan a entender mejor las propiedades ya descubiertas y para sugerir nuevos experimentos. La *teoría corpuscular* de la luz, sería una de estas hipótesis.

Toda su obra es una lucha en la búsqueda de una pretendida objetividad. En los '*Principia*', el estilo es fundamentalmente deductivo, en el que a partir de la hipótesis de la Ley de la Gravitación, deduce matemáticamente consecuencias que coinciden con el comportamiento real de los cuerpos. Sin embargo, '*Opticks*' es un libro totalmente distinto: escrito en inglés para un público menos selecto, induce a partir de docenas de precisas experiencias las propiedades para él indiscutibles de la luz. Cuando enuncia una propiedad cierta, la defiende con vehemencia, pero cuando lo que propone es una hipótesis sin confirmar como la existencia del éter o los corpúsculos de luz, como aparecen en sus escritos privados o en las *queries*, lo explicita de modo suficientemente claro para que el lector sepa a qué atenerse en cada momento. Expondré como ejemplo, que cuando Hooke le recrimina que en su nueva teoría subyace una hipótesis corpuscular de la luz contraria a la ondulatoria que defendían tanto él como Huygens, Newton (1672) le responde:

...Yo ya sabía que las propiedades que afirmé para la luz, podían ser explicadas no sólo por esa sino por otras hipótesis mecánicas. Y por tanto elijo ignorarlas todas y hablar de la luz en términos generales considerándola de modo abstracto como algo propagado en línea recta desde los cuerpos luminosos sin determinar qué cosa es.

Pocas veces se encuentra un científico que conceda tanta importancia a la estructura y metodología del conocimiento científico, pero como cualquier persona, Newton, no podía ser neutral. Sus fuentes atomistas de juventud le hicieron apostar más o menos explícitamente por una teoría corpuscular de la luz. De no ser así, no habría dedicado tanto espacio a sus *queries*, ni las habría incrementado en sus sucesivas ediciones de '*Opticks*'. De hecho, sus hipótesis son en la práctica teorías para muchos historiadores y ello da lugar a confusiones en la interpretación de su obra.

Los inicios con prismas

En el año 1666, su *annus mirabilis*, Newton intentó la construcción de lentes esféricas aplicables a los telescopios refractores, para evitar la aberración cromática pero no consigue ningún resultado. A partir de su despertado interés por el color, adquirió en alguna feria comarcal tres prismas sin demasiada calidad, y es cuando inicia sus trabajos de descomposición de la luz blanca. Al igual que Grimaldi practicó un agujero de media pulgada en las contraventanas de su habitación por el que dejaba pasar un rayo de sol que hacía llegar a prismas y pantallas. Lo que para otros hubiera sido sólo un pasatiempo, para él supuso enfrentarse a un mundo nuevo, el del color, en el que volcó sus energías.

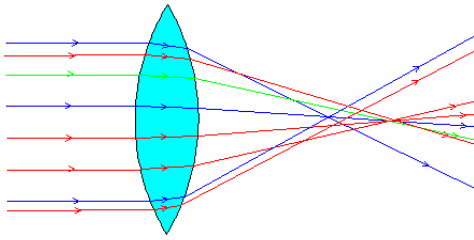


fig. 2.35
Aberración cromática

Es en 1669, cuando ya es nombrado Lucassian Professor y resume en sus '*Lectiones Opticae*' sus primeras teorías ópticas, tienen un núcleo más centrado en problemas de refracción. En ellas formaliza matemáticamente sus intuiciones físicas del *annus mirabilis*. Están escritas en un estilo geométrico con desarrollos matemáticos más desarrollados a donde nos remite desde '*Opticks*' en más de una ocasión.

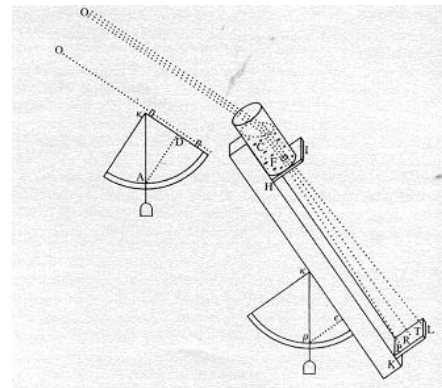


fig . 2.36 Refractómetro utilizado por Newton en el Trinity College

En su mencionada carta de 1672 a Oldenburg, describe sus experiencias con prismas que dan lugar a la que sería para él la más extraordinaria teoría del mundo de la filosofía natural, hasta la fecha descubierta. Sus ideas al respecto empiezan a gestarse entre los años 1664-66, las formaliza en las '*Optical Lectures* ', pero no las publica hasta la carta referida.

En primer lugar indica cómo le sorprendió el hecho de que la imagen del sol sobre una pantalla, que daba el prisma, no era circular sino *oblonga* (alargada). El resultado era una forma rectangular cinco veces más alta que ancha, con las líneas laterales nítidas, pero con las bases semicirculares y difusas. Buscando causas a este resultado, indagó la influencia de los espesores y las irregularidades del vidrio, la proximidad de las zonas de sombra, e incluso la posibilidad de que la refracción de los rayos incidentes fuera la responsable de este incremento de tamaño. A fin de

desechar esta causa, orientó el prisma respecto al rayo de manera que incidiera según el ángulo de *mínima desviación*, que es aquel en que un fino rayo incidente, emerge tras la segunda superficie, con el mismo ángulo que el formaba con la primera. Si un foco extenso como el sol incidiera según esta orientación, se vería desviado, pero de igual tamaño. En cualquier otra dirección, la imagen se ve mayor o menor.

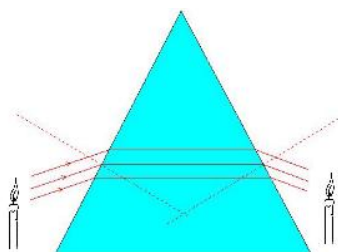


fig .2.37 Ángulo de mínima desviación

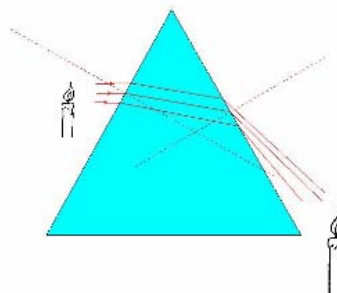


fig. 2.38 Ángulo arbitrario

Sin embargo, el resultado fue el de la figura adjunta. Es como si el círculo original contuviera al menos otros cinco policromados que el prisma había conseguido separar a lo largo de una línea. Colocado un segundo prisma perpendicular al primero, la figura oblonga giraba en diagonal.

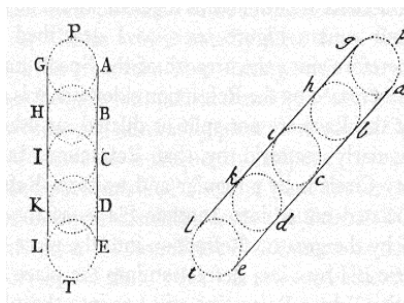


fig . 2.39 La dispersión oblonga

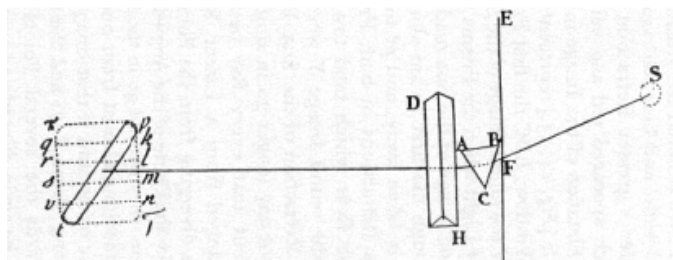


fig .2 .40

Para descartar la influencia de las irregularidades del vidrio, colocó un segundo prisma invertido tras el primero. De esta forma, aunque el segundo invirtiera las refracciones, el efecto de las irregularidades se ampliaría. Sorprendentemente se obtuvo la misma imagen, luego las irregularidades no tenían ningún efecto.

A partir de entonces, se suceden las experiencias, en las que sigue escrupulosamente el método baconiano: experimentar un fenómeno concreto aislando las variables significativas fijando las demás, y a partir de los resultados, inducir las propiedades de validez general. En ellas comprueba que si las dos mitades de una cartulina se colorean con rojo y verde respectivamente, sus imágenes

se ven en una posición distinta, y que si un foco de luz blanca se observa a través de una lente convergente, sus imágenes nítidas se ven en un lugar distinto.

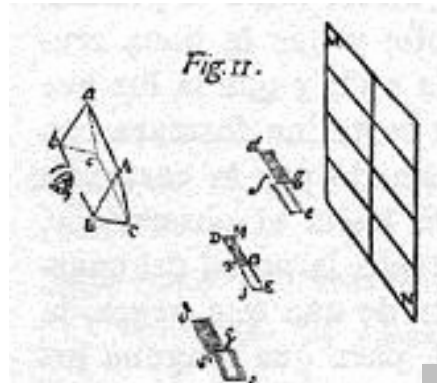


fig . 2.41 Refracciones de una lámina bicolor

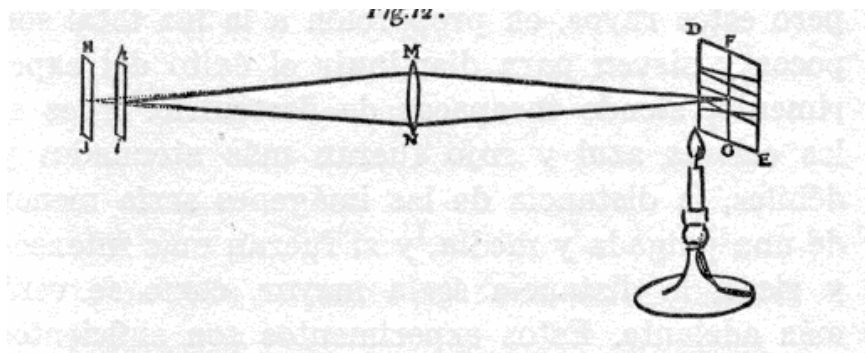


fig . 2.42 Distintas focalizaciones de la luz blanca

A partir de ese momento, las interrogantes aparecen en cascada: ¿podría ocurrir que la luz blanca fuera una mezcla de colores, y que la única función del prisma fuera separarlos y no la de crear los colores como defendían todos sus precursores? ¿podría suceder que cada color refractara de modo distinto? ¿cuál es el mecanismo responsable de la refracción? ¿qué característica diferencia la luz de cada color? ¿cómo investigar lo que es propiedad real de lo que es mera especulación?. Un experimentador nato como él, buscaría la respuesta en la misma Naturaleza.

El Experimentum Crucis más conocido de la Ciencia

En su carta relata los detalles del montaje de su Experimentum *Crucis* que aparece previamente en sus *Lectures*. En síntesis, relata cómo tras el espectro del primer prisma **ABC**, coloca una rendija

G que separa un solo color de todos los que incidían en una pantalla **DE**. Una segunda rendija **g** en una pantalla de garantiza su trayectoria rectilínea y su monocromaticidad. Haciendo incidir este rayo monocromo sobre un segundo prisma **abc**, observó que el rayo lo atravesaba refractándose de nuevo pero sin cambiar ya su color recogiendo en la pantalla **NM**. Por ello se podía deducir que la función de ambos prismas era la de separar colores previamente existentes y no modificarlos. En su afán de rigor, diseñó nuevas variantes de esta experiencia que reforzaron lo que el llamó verdaderas *propiedades* de la luz basadas en experimentos, y no meras hipótesis.

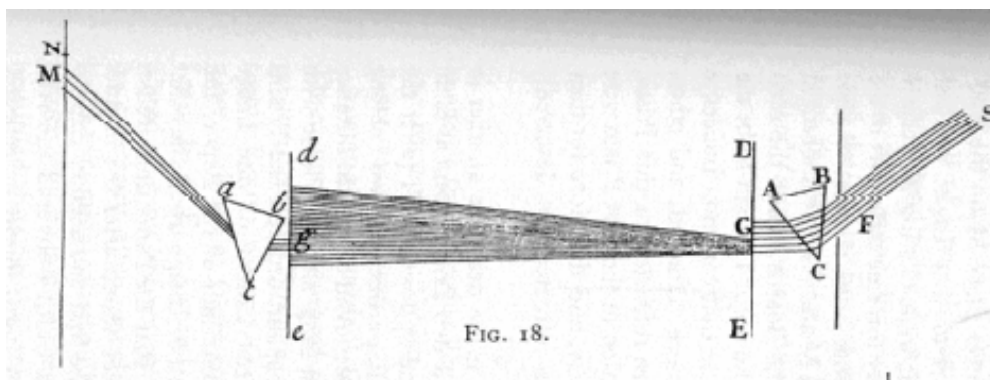


fig . 2.43 Dibujo autógrafo del Experimentum de Newton

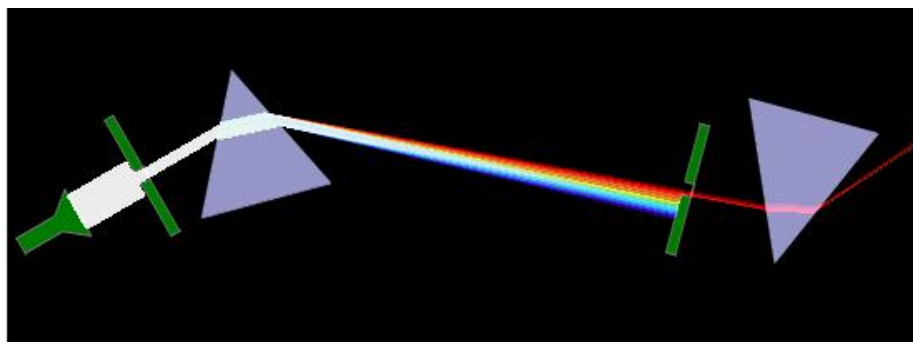


fig . 2.44 Simulación del Experimentum con software científico

Pero Newton no se quedó en el análisis del fenómeno sino que procedió a su síntesis mediante una lente convergente que reúne todo el espectro en un punto de la pantalla. La observación de que su mezcla reproducía de nuevo la luz blanca supuso para él lo más sorprendente de todos sus descubrimientos. En lo sucesivo quedaban definitivamente asentadas unas nuevas propiedades que daban lugar al nacimiento de la óptica física. Aunque enuncia hasta trece puntos, destacaremos sólo los más relevantes:

- Los rayos de luz difieren tanto en refrangibilidad como en color. Los colores son propiedades innatas de los rayos. Hay una correspondencia biunívoca entre color y refrangibilidad del rayo que permite aplicar la ley de Snell a cada rayo individual. A partir de este momento, la Teoría del Color admite una formulación matemática.
- Cuando se consigue aislar un rayo de un color determinado, mantiene obstinadamente dicho color cualesquiera que sean los intentos por cambiarlo. Por dispersión o concentración podemos cambiar su brillo, pero nunca su *especie*. Es posible mezclar colores elementales para dar nuevos colores.
- Lo más sorprendente de todo es que el color blanco no sea un color puro, sino mezcla de todos los demás.
- El color de los cuerpos naturales es debido a su capacidad de reflejar una cierta clase de luz más que otras. Así por ejemplo, el minio iluminado por distintos colores, los refleja todos, pero el rojo con mucha más intensidad. Ello explica que el minio, iluminado con luz blanca, se vea de color rojo. Por ello no tienen sentido las viejas preguntas acerca del color de los objetos en la oscuridad, ni si estos son cualidades de los objetos, puesto que el color es una cualidad de la luz. Vemos el color debido a la impresión que esta luz hace sobre nuestra retina.

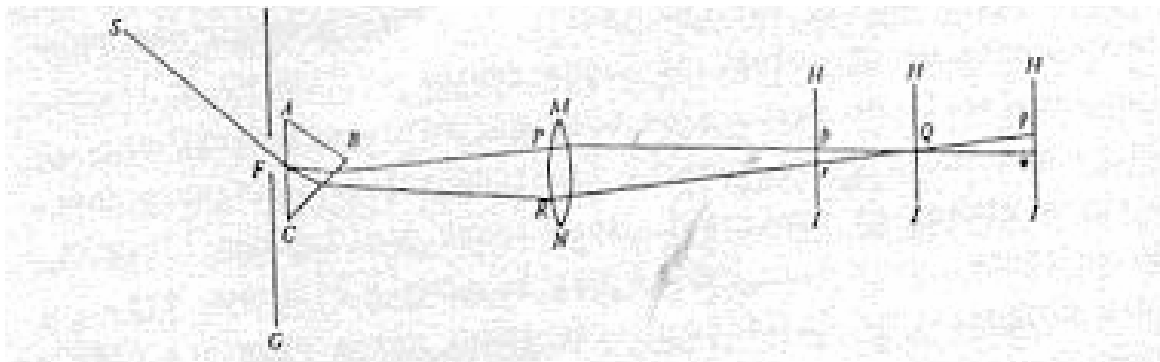


fig . 2.45 Recomposición de la luz blanca tras su dispersión en un prisma

Teorías que explican el Experimentum

Tras establecer como propiedades indiscutibles los enunciados expuestos, el siguiente paso en su mente fue la búsqueda de los porqués. Metido al terreno de la especulación, Newton superó sus iniciales concepciones aristotélicas del color y, a partir de 1666 se adscribe a la hipótesis de emisión de la luz en la que sus corpúsculos integrantes tendrían diferente tamaño y velocidad. Se

ha convenido en asignar el término *emisión* a su teoría, frente al de *teoría de los medios* de Huygens que necesitaba de un medio para transmitir la acción.

La refracción y la reflexión las explica en un primer momento por la hipótesis de un éter más denso en el exterior que en el interior de los cuerpos cuyos poros impregna. La sobrepresión de la zona de más éter a la de menos, crea la aceleración del rayo y lo desvía. Si la curvatura es extrema, el rayo saldría reflejado. La objeción inmediata a este modelo es que la velocidad de la luz en zonas de distinta densidad debería influir en la velocidad de la luz en contra de todas las experiencias y observaciones.

Más tarde, en un *scholium* de sus '*Principia*' (Newton, 1971), propone la acción de una fuerza de corto alcance en la zona de contacto aire-medio capaz de desviar la trayectoria de las partículas de luz con un mecanismo idéntico al que sufre un proyectil en un tiro parabólico. Una vez que la atraviesa, continúa su camino en una trayectoria recta.

... la superficie de los cuerpos ejerce algún poder que se difunde por encima de su superficie.

En este modelo incluso propone cuantificar el fenómeno en función de la velocidad del haz incidente (supuesta distinta para cada color), de la masa del corpúsculo, de la fuerza por unidad de masa y de la distancia del corpúsculo a la superficie refractante. Años más tarde, en 1691, preguntó al astrónomo de Greenwich, Flamsteed, si en sus observaciones de la ocultación de los satélites de Júpiter, había observado diferencias en su color. Si las velocidades de cada luz monocromática fueran distintas, las radiaciones más rápidas se verían al principio y las lentas al final. Sin embargo la respuesta fue negativa y nuevas contradicciones, hicieron inútil la tentativa de adoptar un modelo unificado para la óptica y la mecánica.

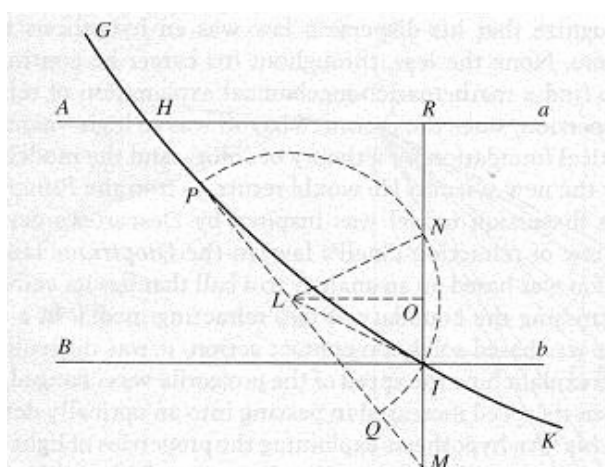


fig. 2.46 Supuestas atracciones de los corpúsculos luminosos por la materia en la refracción

Los anillos de Newton

Recordemos cómo Hooke consigue explicar los colores que aparecen al iluminar las de las láminas delgadas de mica (aunque no logra calcular su espesor), o de las cambiantes tonalidades de verde a morado que aparecen en el cuello de las palomas según la dirección de la observación y elige este montaje como su *Experimentum Crucis* que demostraría la obtención de cualquier color a partir de los tonos rojo y azul. Mientras que para la



fig .2.47 Colores virtuales en el cuello de la paloma para Aristóteles.

tradición escolástica éstas coloraciones eran virtuales y de naturaleza distinta a la de los objetos que siempre mostraban el mismo color, tanto él, como Descartes y Boyle, interpretan que puesto que si observamos un cuerpo de *color real* y otro de *color virtual*, la sensación del color es la misma en ambos casos, no hay motivo para diferenciar la naturaleza de ambos fenómenos.

Sin embargo, para Newton, poseedor del mejor bagaje matemático de su época, y de otra concepción de cómo se construye la Ciencia, la experiencia de Hooke modificada ligeramente, se erige a su vez como un nuevo *Experimentum Crucis* para explicar las propiedades periódicas de la luz y reforzar su teoría de emisión.

Si la refracción de los colores se pudo explicar sucesivamente la acción de fuerzas a distancia como la acción de un éter de densidad variable, o debida a un nuevo éter muy liviano, cuando Newton intenta unificar en una única teoría los colores virtuales de los reales, su genio necesitó dar un nuevo paso revolucionario: la invención de los *fits*.

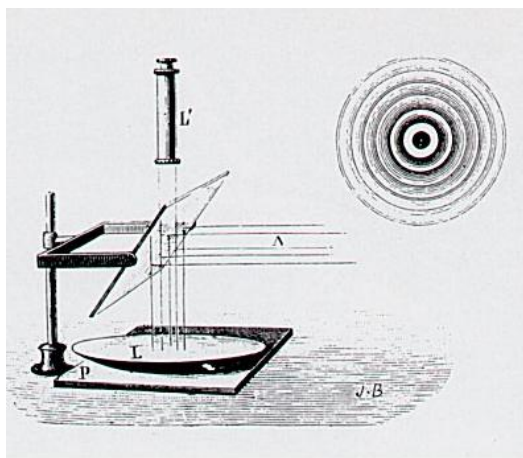


fig . 2.48



fig . 2.49

En sus experiencias de las láminas delgadas, Hooke fue incapaz de calcular el espesor de sus láminas, y la aparición de los distintos colores la atribuye a sensaciones “fuertes” o “débiles” de los sucesivos pulsos en la retina. Para él, estos argumentos eran suficientes para justificar su modelo y proponerlo como Experimentum Crucis.

Cuando Newton retoma el estudio de los colores virtuales que aparecen en estas láminas, aborda el problema del cálculo de la distancia recorrida por la luz, y se le ocurre un montaje genial:

Hace incidir luz blanca sobre una lámina semitransparente que es reflejada hacia una lente plano-convexa **L**. Aunque parte de la luz se refleja, otra la atraviesa, llega a una superficie plana reflectante y regresa de nuevo hacia la lámina que es atravesada, y observa mediante un ocular **L'** la aparición de una mancha central oscura seguida de anillos de distintos colores que se repiten periódicamente espaciados por anillos oscuros.

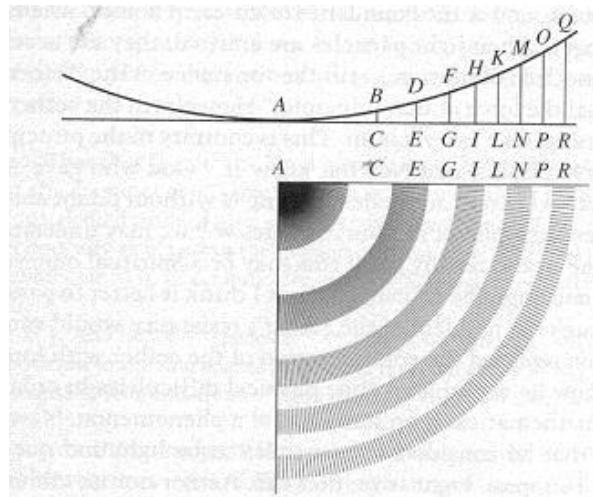


fig . 2.50

Sin embargo, si la luz es monocromática (obtenida de un prisma mediante el fenómeno del ángulo límite), aparece de nuevo la mancha central seguida de decenas de anillos del mismo color.

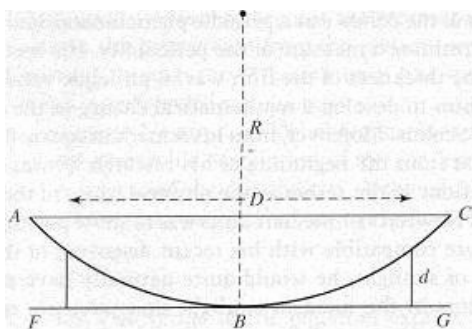
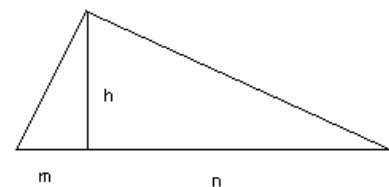


fig . 2.51



Aplicando el conocido teorema de Euclides que relaciona la altura de un triángulo sobre un lado con las proyecciones adyacentes de los otros dos:

$$(2R-d).d = (D/2)^2 \Rightarrow 2Rd-d^2 = D^2/4$$

Despreciando d^2 puesto que las lentes elegidas, procedentes de sus experiencias con telescopios refractores, eran de una gran distancia focal, llegó a la expresión:

$$d = D^2/8R = m I/2$$

donde I es un intervalo tal que para m impar, el anillo es brillante y para m par es oscuro.

Luego es posible calcular el intervalo de aire entre las dos superficies a partir de la medida del diámetro D de cada círculo (que efectuó con gran precisión con un compás).

Una observación más serena añadió una observación sorprendente: Si se observaba la luz propagada a través de las dos lentes en lugar de la reflejada, en las zonas iguales se veían los colores complementarios. Es decir, si en el punto de contacto se veía una zona oscura desde el ocular superior, visto a su través, se obtenía luz blanca.

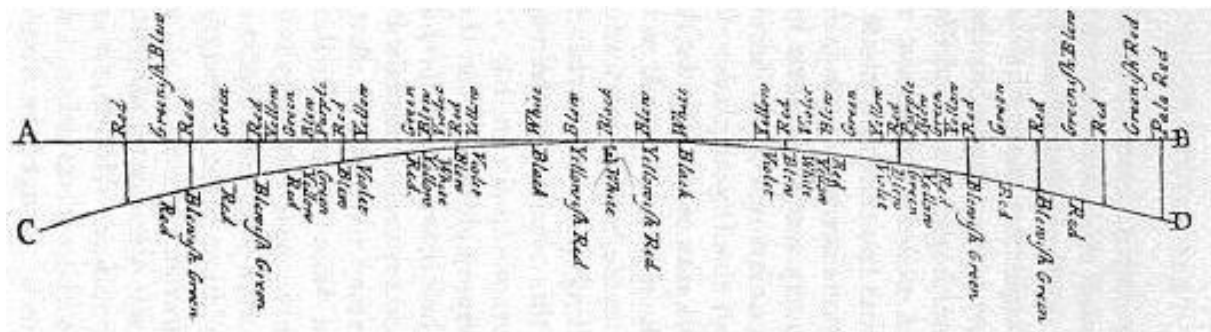


fig . 2.52

Si se reflejaba azul, se transmitía roja, si amarilla, violeta, si roja azul, y así sucesivamente... la experiencia era un modelo de agudeza experimental. De la periodicidad de los anillos se deducía de modo para él concluyente que los rayos de luz (o los corpúsculos hipotéticos) venían acompañados de propiedades periódicas que se repetían a intervalos iguales. A estos estados de fácil o difícil transmisión ya referidos, tan mal entendidos en su época, les atribuía propiedades especiales:

Todo rayo de luz adquiere al pasar por cualquier superficie refringente una cierta constitución o disposición transitoria que en la progresión del rayo retorna a intervalos iguales, y hace que el rayo, a cada regreso de esta disposición, sea transmitido fácilmente a través de la superficie refringente que viene detrás, y que en los puntos

intermedios de este estado, sea fácilmente reflejado por la misma superficie(Libro II , Parte III, Proposición XII).

Por ello, si un rayo atraviesa la primera superficie, será dispuesto a intervalos iguales a ser fácilmente reflejado o transmitido por una segunda superficie.(Newton, 1971)

En un lenguaje más próximo, diríamos que la luz incidente que llega a la primera superficie es parcialmente reflejada y parcialmente transmitida, pues ya viene acompañada desde su foco de estos *accesos (fits)* .Para Newton, ésta primera luz reflejada no tenía ningún efecto en la observación de los colores. La transmitida atraviesa la capa refringente y puede ser de nuevo transmitida o reflejada, según el estado que presente en ese instante. Si ésta última es reflejada por la superficie plana, dependiendo del intervalo del *fit* de cada color, si el color es el adecuado se reflejará formando un anillo formado por todos los puntos equidistantes y será observado en el ocular, mientras que el resto de los componentes del rayo inicial será transmitido en el color complementario.

El gráfico adjunto aproxima la idea de estos accesos de fácil reflexión y transmisión (Taton,1988) por los que pasa sucesivamente el rayo de luz.

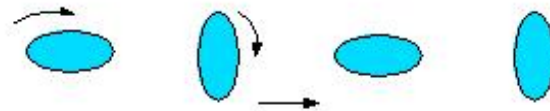


fig. 2.53. Una aproximación a los *fits* de Newton

En el cuerpo doctrinal de Newton, los *fits* juegan un papel clave. Mientras que la hipótesis corpuscular es sólo una suposición plausible, la existencia de éstos es para él un hecho demostrado sin el que no se podría entender la periodicidad de los anillos. Hoy día sabemos que su teoría aplicada a las láminas paralelas, era esencialmente errónea pues sólo tenía en cuenta los rayos reflejados por la segunda superficie. Un sencillo polarizador colocado adecuadamente en el camino de la luz reflejada por ambas superficies, elimina la luz reflejada y anula inmediatamente la aparición de los colores lo que demuestra que es la interferencia de los dos rayos la responsable.

Su modelo del éter de densidad variable que explicaba la refracción y reflexión, no podía explicar el fenómeno de los anillos y tuvo que idear otros nuevos:

- En su primera carta a Oldenburg, el entonces secretario de la Royal Society, propone que el rayo incidente a la lámina plano-paralela provoca vibraciones longitudinales periódicas en el éter (un medio compacto más liviano que el aire, que ocupa los poros del medio y por tanto menos denso en éste que en el exterior) del mismo modo que una piedra provoca ondas transversales en el agua. Estas vibraciones viajarían más rápido que los mismos rayos, produciendo zonas de enrarecimiento y sobrepresión. El rayo que llega a la superficie enrarecida la atravesaría, siendo pues refractado, mientras que si llega a una zona con gran densidad de éter sería reflejado.
- Sin embargo, sus trabajos sobre la fuerza de gravitación actuando a distancia en 1680, le hacen entonces apostar por la acción a distancia entre corpúsculos de materia y rayos de luz, adoptando una polémica visión matemática de la Naturaleza. Los *fits* serían entonces cualidades cambiantes del rayo de luz responsables de su interacción con la superficie de incidencia.
- La experiencia de Francis Hauksbee confirmando que la atracción electrostática podía suceder en el vacío, así como sus investigaciones en difracción, cambiaron de nuevo el pensamiento de Newton. En la segunda edición de los '*Principia*' de 1713 aparece de nuevo la existencia de un complicado éter formado de minúsculas partículas muy distanciadas entre sí, más liviano y elástico que el antiguo, capaz de explicar las atracciones y repulsiones eléctricas y gravitatorias a partir de fuerzas asociadas a sus partículas (*queries* 17 a 24 de la 4ª edición de '*Opticks*'). Para Newton, el nuevo éter no sustituía a las acciones a distancia sino que las complementaba.

Sus últimas teorías sobre el color

Tras su ruptura con las tesis coetáneas de que el color se producía como una modificación de la luz blanca, sus experiencias con las láminas paralelas y los anillos le llevaron a aplicar su propuesta del color de las láminas delgadas para explicar el color a los medios opacos por el mismo principio.

En su concepción atomista de la materia y luz, los cuerpos estarían formados por corpúsculos y poros impregnados de éter. Veamos su discurso: puesto que la reflexión ocurre cuando hay diferencias de densidad óptica, los cuerpos deben tener poros de distinta densidad que los corpúsculos. La opacidad es causada por las partes internas del cuerpo en múltiples reflexiones que impiden la transmisión de la luz su través.

Merece interés analizar dos densas páginas de '*Optiks*' (Newton, 1730b) en las que relaciona los colores espectrales obtenidos mediante prismas, con los colores obtenidos por mezclas de los

mismos a partir de rayos monocromáticos obtenidos de prismas distintos y observando su mezcla en una pantalla.

Es casi seguro que la comprobación de que observaciones como que un color naranja obtenido de mezclar rojo y amarillo monocromáticos del obtenido en el espectro, fueran indiscernibles del espectral para el ojo humano, fuera lo que le hizo definir el color como una *cualidad secundaria* obtenida por la interpretación mental y sensación del fenómeno físico en nuestro cerebro. En sus palabras:

...Pues los rayos, para hablar con propiedad, no son coloreados. En ellos no hay más que una cierta disposición para provocar una sensación de este color.(Newton, 1971)

Su concepción del color sería un efecto visual causado por la composición espectral de la luz emitida, transmitida o reflejada por los objetos.

Su famosa rueda del color aparece en un apartado al que titula ‘*En una mezcla de colores primarios, conocidos la Cantidad y Calidad de cada uno de ellos, conocer el Color de uno Compuesto*’. En su búsqueda de relacionar el sonido y la luz, representa, también por primera vez en la literatura científica, una rueda con siete colores en sectores circulares, con superficies proporcionales a los siete tonos y semitonos de una escala musical (llamada *Dórica* por los músicos). En el perímetro están representados los colores espectrales puros o saturados, DE representa el rojo, EF el naranja, FG al amarillo, y en el interior están los colores no saturados obtenidos añadiendo gradualmente color blanco al saturado de modo que en el centro O figure el blanco. En D y en sus puntos próximos, a lo largo de OD, aparece el color no espectral llamado *púrpura* mezcla del rojo y violeta.



fig. 2.54 Dibujo original de Newton

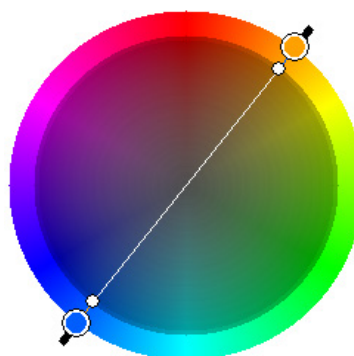


fig . 2.55 Versión actualizada del dibujo anterior

Dibujando pequeños círculos en los puntos **p, q, r**, de áreas proporcionales al número de rayos de cada color que integran una mezcla determinada, es posible componer, asignando distintos pesos a cada color, el centro de gravedad del sistema resultante en un punto **z** que nos da el color resultante. La distancia de **z** al punto **O** nos indica el grado de saturación. Si **z** varía a lo largo del radio **OY** pasaría desde los tonos no saturados del color naranja hasta su color puro en **Y**.

Sabemos que este diagrama no tiene en cuenta la luminosidad del color, para la que haría falta un tercer eje vertical, y que él mismo reconoce la imposibilidad de cuantificar el número de rayos pero su propósito de descifrar las componentes y pesos de los colores monocromáticos de un color dado, comparando su posición en el círculo y sus distancias a los extremos de una línea que pase por ella, es el principio que utilizan las máquinas computerizadas que hoy día consiguen industrialmente los colores.

Los desencuentros con la difracción y la polarización

En diciembre de 1675, Newton envía a Oldenburg su '*Hipótesis explicativa de las propiedades de la Luz*'. en la que, entre otros, comenta el extraño fenómeno referido por Hooke y Grimaldi por el que un rayo de luz próximo al filo de un cuchillo, desvía su trayectoria, o el que la sombra de un cabello sea mucho más ancha de lo que debiera suponer una trayectoria recta de los rayos. Veámoslos con algún detenimiento lo que él llamó *inflexión* de la luz:

Al pasar la luz por las proximidades de un obstáculo, observó que los rayos más próximos se desviaban como si una fuerza les atrajera en sus proximidades. Además, aparecían franjas disjuntas coloreadas.

Con los filos de dos cuchillos consiguió una rendija de anchura variable al paso de un estrecho haz de luz, los rayos de luz se curvaban cada vez más.

A la luz de su teoría del éter de densidad variable excitado por las partículas de luz, la sobrepresión externa al obstáculo, desviaba el rayo hacia las zonas de menor densidad, con una intensidad variable según el color

Sin embargo si el obstáculo era un cabello humano, aparecían también franjas paralelas discontinuas coloreadas pero los rayos se desviaban hacia fuera, dando una sombra mucho más ancha de la supuesta. La trayectoria del rayo sufre pues una repulsión.

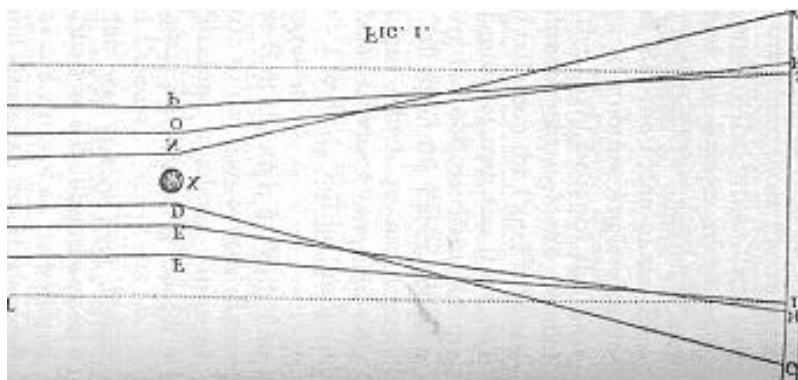


fig . 2.56 Difracción de la luz a su paso por un cabello para Newton

Debemos aceptar que las observaciones de Newton en esta experiencia no fueron muy finas pues en realidad los rayos también se curvan hacia adentro (¿podemos atribuirlo a su presbicia dada su edad?), pero estas malas observaciones le dieron pie, una vez más, a renunciar a la teoría ondulatoria. Al comparar las propiedades de las ondas sonoras, que se curvan tras un obstáculo extenso hacia su interior, y son capaces de viajar a través de tubos doblados, argumenta que sucedería lo mismo con la luz en contra de su experiencia. La inflexión de la luz viaja hacia fuera de la sombra y no hacia dentro como en el sonido. De otro lado, cuando un planeta eclipsa a una estrella, su luz no lo bordea, lo que refuerza de nuevo su terquedad atomista contra una teoría ondulatoria (*querie* 28 de '*Opticks*')

Con la birrefringencia de la luz que se desdobla en dos rayos al incidir sobre un cristal de Espato de Islandia, recién descubierta por Bertelius, no es más afortunado: propone una tercera cualidad para el rayo de luz (además del color y la periodicidad) que llamó *sides*. Serían como orientaciones del rayo perpendiculares a la dirección de propagación de modo que un rayo incidente en el cristal de calcita será difractado de modo ordinario o extraordinario según la orientación de la *side* relativa al cristal del mismo modo que la fuerza entre dos imanes depende de su orientación relativa. Esta analogía con los polos magnéticos es la responsable del término *polarización*.

Newton, ya al final de su etapa investigadora, probablemente se diera cuenta de la inconsistencia de sus explicaciones y decide romper bruscamente con ambos problemas, alegando un aplazamiento para la ejecución de más experiencias que iluminen el problema, remitiéndonos a las *queries* para un tratamiento nuevamente confuso y superficial.

El arco iris primario explicado matemáticamente

El autor que más se había acercado al tratamiento del arco iris, el francés Descartes, había llegado a explicar de modo empírico, los ángulos que formaban los rayos incidente y refractado tanto para el arco iris primario como para el secundario. Si el rayo incidía por la parte superior de la gota, se producía el arco primario tras dos refracciones y una reflexión interna, y si lo hacía por la parte inferior tras dos reflexiones y dos refracciones, se producía el secundario. Había justificado además la existencia de la zona oscura de Alejandro que aparecía entre ambos arcos, pero no había dicho nada correcto respecto a la aparición del color y menos aún al hecho de que en ambos, los colores aparecieran de modo simétrico.

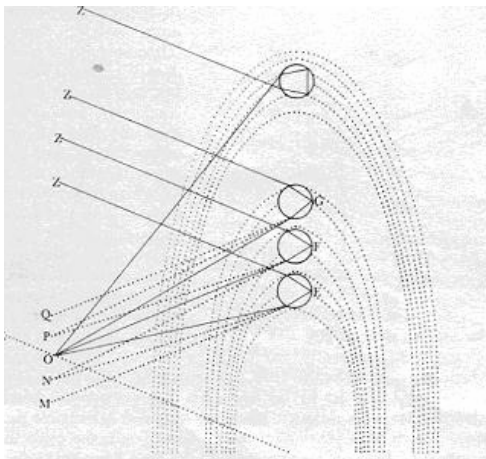


fig . 2.57. Arcoiris primario y secundario en '*Lectiones Opticae*'



fig . 2.58 Los dos arco iris y la zona oscura en Woolsthorpe

Newton, que lee sus trabajos en sus primeros años de Cambridge es injusto cuando pone los tratamientos de Descartes al mismo nivel que los de Marco Antonio de Dominis, pero lo cierto es que el suyo, gracias a la aplicación de la geometría diferencial, supuso otra etapa en la comprensión de la Naturaleza. Su nuevo modelo, además de explicar el porqué aparecen situados los colores en posiciones simétricas en el arco iris primario, es capaz de predecir los ángulos en que aparece cada color. Desgraciadamente para los lectores poco iniciados, Newton divulga sus desarrollos de un modo muy resumido, por lo que son difíciles de seguir con fluidez. Mientras que en '*Opticks*' sólo expone prácticamente sus resultados, el tratamiento matemático preciso de su modelo lo da en '*Lectiones Opticae*'.

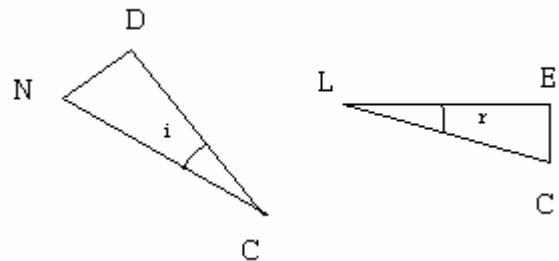


fig . 2.60

El rayo AN, tras su refracción en la gota, llega al punto F, mientras que el An , llega al f. Aplicando la propiedad de que dos triángulos son semejantes si sus rayos correspondientes son perpendiculares,

del triángulo NDC se obtiene $\text{sen } i = DC/NC$ y

del triángulo LEC: $\text{sen } r = EC/LC$

como $\text{sen } i/\text{sen } r = n$ y, de otra parte, NDC y LEC son semejantes, se deduce

$$ND/EC = Cd'/Ce' = n$$

De los triángulos Add, Cd'd, Cle y ZNn, obtenemos relaciones con los ángulos e, e'.

$$\text{sen } e = Dd/Ad \Rightarrow Dd = Ad \text{ sen } e \cong AD \text{ sen } e \quad (1)$$

$$\text{sen } e' = El/Iz \Rightarrow El = Iz \text{ sen } e' \cong EZ \text{ sen } e'$$

Por otra parte , si aproximamos el arco a la cuerda en el triángulo ANn y en el ZNn, puesto que los rayos son muy próximos, aplicando el teorema del seno, la igualdad de los senos de un ángulo con el coseno de sus complementarios, y el hecho de que en el límite, Nn es perpendicular al radio CN tendremos:

$$\text{sen } e/Nn = (\text{sen } ANn)/An = \cos i/An \Rightarrow \text{sen } e \cong \cos i (Nn/An) \quad (2)$$

$$\text{sen } e'/Nn = (\text{sen } nNZ)/nZ = \cos r/nZ \Rightarrow \text{sen } e' \cong \cos r (Nn/nZ)$$

Dividiendo las igualdades (1): $Dd/El = (AD/EZ) (\text{sen } e/\text{sen } e') \quad (3)$

Y de las igualdades (2) se deduce:

$$\frac{\frac{\text{sen } e}{\text{sen } e'}}{\frac{Nn}{NZ}} = \frac{\frac{AN}{AN} \cos i}{\cos r}$$

luego llevando esta relacion a (3):

$$\frac{Dd}{Ee} \cong \frac{AD}{EZ} \frac{NZ}{AN} \frac{\cos i}{\cos r}$$

de la relacion (2)

$$\frac{Dd}{Ee} = \frac{AD}{EZ} \frac{NZ}{AN} \frac{\cos i}{\cos r} \Rightarrow \frac{Dd}{Ee} \cong n \left(\frac{I}{R} \right)$$

En consecuencia

$$\frac{NZ}{EZ} \cong \frac{I}{R} \frac{AN}{AD} \frac{\cos r}{\cos i} \quad (4)$$

Cuando el foco se va al infinito, los rayos AN y AD se hacen infinitamente grandes pudiéndose considerar iguales y su cociente se hará la unidad, luego podemos expresar (3) de otra forma:

Cuando dos rayos llegan paralelos, sus refracciones se cortan en un punto Z interior al círculo, pero Newton conocía por Descartes, que en la posición de máximo, los rayos incidentes paralelos a una cierta distancia del diámetro central, emergían también casi paralelos. Sus conocimientos de geometrías diferencial, le sirvieron para asegurar que en el límite de rayos muy próximos, el punto Z se confundiría con F y f. En estas condiciones, el segmento NZ se hace igual al NF y por ello $NZ = 2 NE$, pues por construcción, E se toma en el punto medio de NF.

$$\frac{NZ}{EZ} \cong \frac{I \cos r}{R \cos i} \quad (5)$$

$$\text{pero } \cos r = \frac{NE}{NC} = \frac{NF}{2NC} \quad \cos i = \frac{ND}{NC} = \frac{NP}{2NC}$$

$$\text{porque } NE = \frac{NF}{2} \quad \text{y} \quad ND = \frac{NP}{2}$$

de donde

$$\frac{\cos r}{\cos i} = \frac{NF}{NP}$$

luego el cociente (3) quedara definitivamente de la forma:

$$\frac{NE}{EZ} \cong \frac{I}{R} \frac{NF}{NP} \quad (6)$$

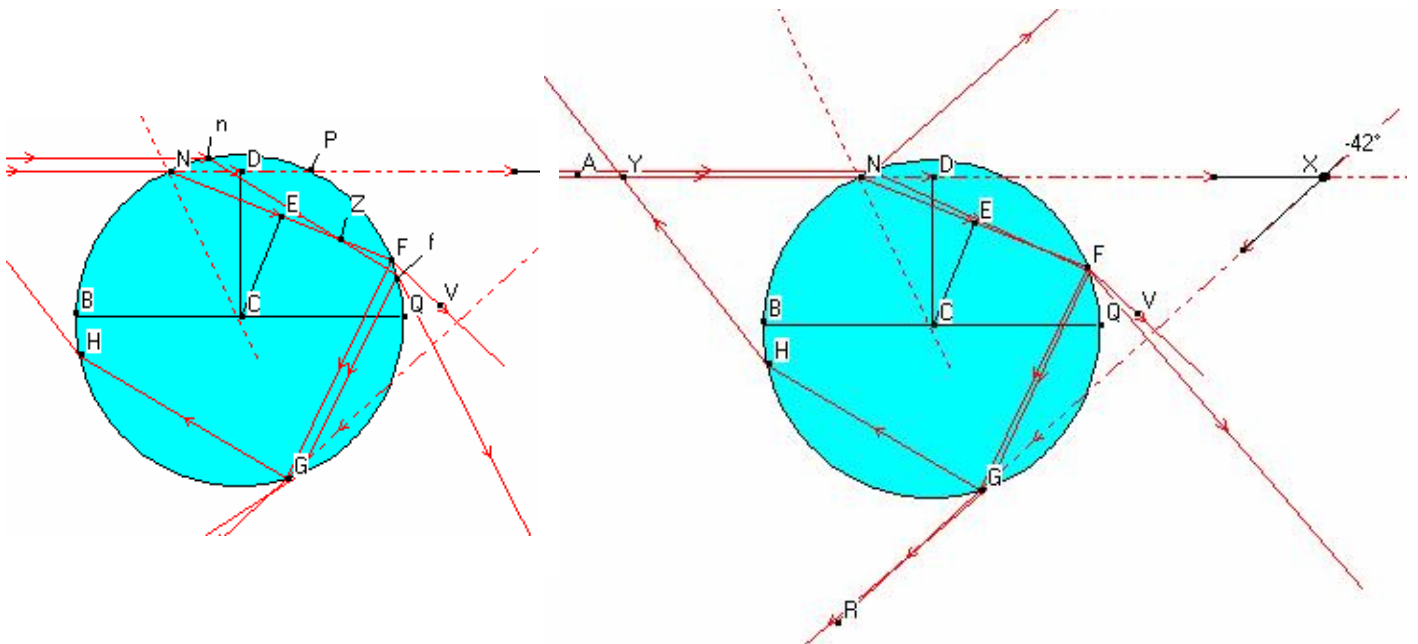


fig. 2.61 Máxima concentración de rayos a la salida del ángulo de máxima desviación (en torno a los 42°)

La clave de la demostración está en el hecho de que en las proximidades del ángulo crítico, rayos incidentes en el punto N, paralelos muy próximos entre sí, dan lugar a rayos de salida en G prácticamente paralelos.

Por un lado tenemos que:

$$\frac{NZ}{NE} = 2$$

y por otro:

$$\frac{NZ}{EZ} = \frac{I \cos r}{R \cos i} = 2$$

elevando al cuadrado

$$\frac{I^2 \cos^2 r}{R^2 \cos^2 i} = 4$$

A partir de aquí , aplica las conocidas relaciones trigonométricas:

$$\cos^2 r = 1 - R^2 \quad \cos^2 i = 1 - I^2$$

$$3 = \frac{I^2 \cos^2 r}{R^2 \cos^2 i} - 1 \Rightarrow 3 \cos^2 i = \frac{I^2 \cos^2 r - R^2 \cos^2 i}{R^2} \Rightarrow$$

$$3 \cos^2 i = \frac{I^2 (1 - R^2) - R^2 (1 - I^2)}{R^2} \Rightarrow$$

$$3 \cos^2 i = \frac{I^2 - R^2}{R^2} = \frac{I^2}{R^2} - 1 \Rightarrow$$

$$3 \cos^2 i = \frac{I^2}{R^2} - 1$$

de donde

$$\boxed{\cos i = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{3}}}$$

Esta expresión da el *ángulo de incidencia crítico* correspondiente a cada color para que se produzca máximo en el arco iris primario. Recordemos que la distancia del rayo al diámetro BQ daba el ángulo de incidencia $\cos i = DC/CN$ donde DC es variable y el radio CN constante.

Descartes, el referente más avanzado de la época, se había quedado en una comprobación empírica del ángulo de desviación medio. Newton, sin embargo, era ahora capaz de calcular el ángulo de incidencia correspondiente a cada color, una vez conocido su índice refracción.

En sus propias palabras:

...Si suponemos que el punto de incidencia N se mueve desde B , continuamente hasta L , el arco QF crecerá al principio y después disminuirá, y por tanto el ángulo AXR , que contiene los rayos AN y GR , será máximo cuando ND sea a CN como $\sqrt{II-RR}$ a $\sqrt{3RR}$, en cuyo caso, NE será a ND como SR es a $I..$ (Newton, 1971)

El tratamiento del arco iris secundario, fruto de dos reflexiones internas y una refracción tras la incidencia del rayo en la zona inferior de la gota, es muy similar. Ahora se obtiene un ángulo mínimo de desviación en torno a los 51° en el que también hay una concentración de rayos a la salida. Su demostración no añade nada nuevo al propósito de este trabajo, por lo que remito al lector interesado a su fuente original, el '*Lectiones Opticae*'. Sí es interesante destacar que :

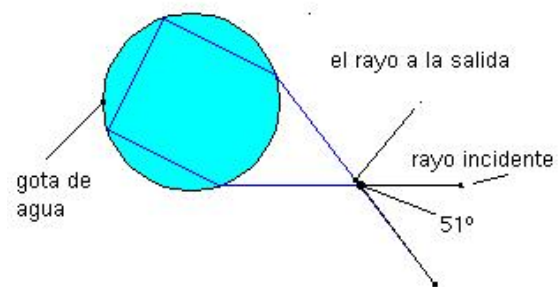


fig . 2.62 El arco iris secundario

- los colores que observamos corresponden pues a gotas diferentes. De cada gota particular en un instante dado, sólo observamos un color concreto.
- Dada la propiedad indicada para ambos arcos, no existirá ningún rayo que incida por la el hemisferio superior de la gota que se desvíe un ángulo mayor de la zona de máximo correspondiente a 42° , ni ninguno que incida por el inferior que se desvíe menos de la de mínimo, 51° . Por tanto, entre ambos arcos no se reflejará ninguna luz, lo que constituye la conocida *zona oscura de Alejandro*.

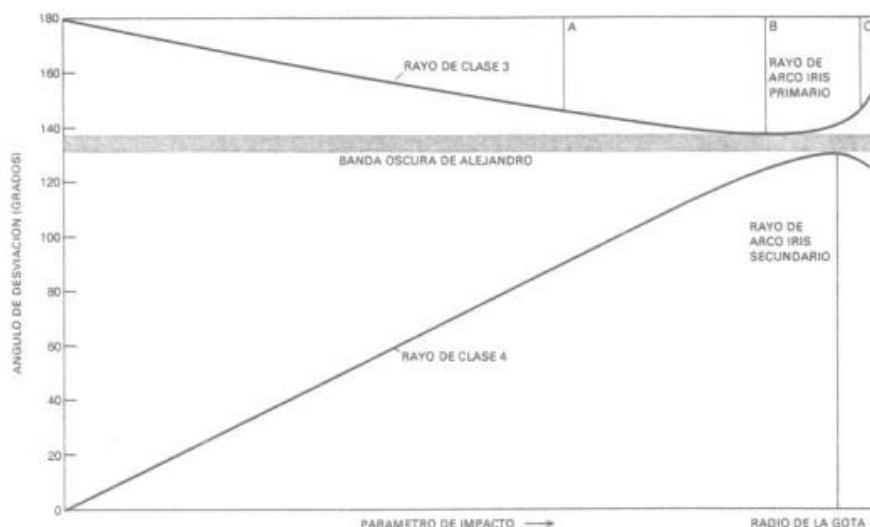


Fig 2.63 Ángulos de desviación en función del parámetro de impacto y zona oscura

- Son posibles varios arco iris primario y secundario dependiendo del número de reflexiones internas que se consideren. Los de orden superior se observan en raras ocasiones debido a su debilitación.

Con estos desarrollos parecía cerrado el tema del arco iris, pues explica incluso la existencia de la 'zona oscura' que se encuentra entre ambos arcos, pues en ella las gotas desvían la luz fuera de nuestras miradas, pero Newton guardó silencio para explicar la más rara aparición del arco iris *supernumerario*, quizás porque su modelo no podía explicarlo. Hubo que esperar a la llegada de Young y Airy, cuando se introdujo en la luz la idea de interferencia, para que su explicación completa fuera posible.

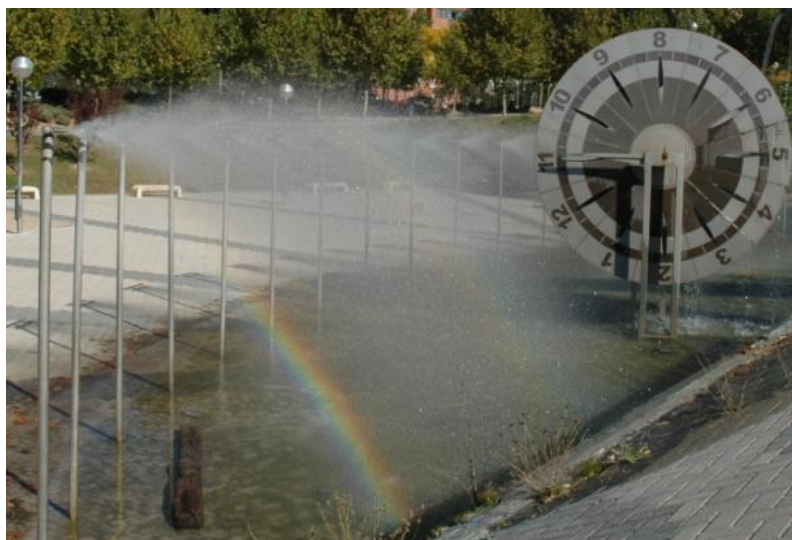


Fig.2.63 Arcos iris primario y secundario con la zona oscura de Alejandro, en una fuente de Madrid

Efemérides de la vida de un sabio

1640 Se publica '*Mathematical Magick*' de John Wilkins. Obra de mecánica popular que Newton leerá en Woolsthorpe

1642 Nace Isaac Newton sietemesino, como hijo póstumo, de Isaac Newton un granjero rico pero analfabeto, en las primeras horas del día de Navidad en la casa solariega de Woolsthorpe, cerca del pueblo de Colsteerworth, a siete millas al sur de Grantham, del condado de Lincolnshire. Familia agrícola acomodada con tierras y sirvientes

1644 Aparecen los '*Principia Philosophicae*' de Descartes

1646 2º matrimonio de su madre Hanna Ayscough, hija de caballero, con el reverendo Barnabas Smith rector de North Withqan título de bachiller en artes y Magister (que aporta un capital considerable y una buena biblioteca con libros de teología).Abandonan a Isaac en Woolsthorpe con los abuelos maternos. Isaac siempre recordará esta etapa de su vida con resentimiento.

Nace el filósofo y matemático Leibnitz su gran rival en matemáticas.

Nace el astrónomo Flamsteed

1649 Declaración de la Common Wealth. Abolición de la Cámara de los Lores. Campañas de Cromwell en Irlanda.
Acude a las escuelas de los pueblos de Skillington y Stoke.

1653 Muere su padrastro Barnabas. Hanna vuelve con sus hermanastros (Mary, Benjamín y Hanna) a Woolsthorpe

1654 Isaac va a la escuela de Grantham a los 12 años. Consigue buena base
(12 -16 años) en latín (lo que le servirá más tarde para que Europa conozca su obra)

y mala en matemáticas. Queda pensionista en la casa del boticario Clark. Se lleva mal con los chicos y bien con las chicas .Una de ellas, Miss Storer (su única relación femenina) dice que le hizo casas de muñecas. Alumno huraño, hosco, cruel con los criados, mordaz y listo, mal aceptado por sus compañeros, poco interesado en la escuela (le asignaban el último banco). Un compañero Arthur Storer, le pega una patada en el estómago y a la salida de la escuela entablan una pelea de la que Newton saldrá vencedor. Como consecuencia, Isaac gana confianza, se crece en los estudios y sube puestos hasta llegar al primero. Escribe su nombre en todos los bancos. Su maestro Stokes se da cuenta de su valía. Gasta su dinero de bolsillo en herramientas. Dedicaba mucho tiempo a inventos y maquetas. Si perdía puestos estudiaba de nuevo para recuperarlos. Se inspira en '*Mysteries of Nature and Art*' de John Bate, y en '*Mathematical Magick*' de John Wilkins . Construye varios relojes de sol, que instala en su casa y en la del Sr. Clark.

1657 (15 años) Fundación en Italia de la Academia del Cimento.

1659 (17 años) Lee '*Mysteries of nature and art*' 1634(John Bates).

'*Physiologia Epicuro-Gassendo-Charltoniana*' (1654) le motiva por la teoría atomista. '*Experimental history of colours*' de R Boyle (1664) '*Micrographia*' de Hooke (1665).

'*Principia philosophicae*' (1644) de R Descartes. '*Géometrie*' de Descartes.

Lee al neoplatónico Henry More '*The immortality of the soul*' (que le inicia al cartesianismo y a la teoría atómica). En 1659, le reclama su madre a casa para organizar las labores agrícolas vuelve a casa. Es un desastre de granjero, en sus horas de trabajo construye maquetas y lee libros a escondidas. Los criados decían que “sólo tenía talento para la Universidad “.Su tío Willian recomienda que vuelva a la escuela para ingresar en la Universidad. Pensionista en casa de su maestro Stoke.

1660 (18 años) Carlos II envía la declaración de Breda y ocupa el trono. Se restaura la Cámara de los Lores. Robert Boyle publica “ News experiments physico- mechanical”

1661 (19 años) El 5 de junio 1661 se traslada a Cambridge como alumno “subsizar” (categoría de estudiante pobre con obligación de servir en las mesas y hacer las camas, etc a los estudiantes fellows, a fellows commoners y a pensionistas. hijos de ricos, a pesar de la desahogada economía de su madre, y después como *sizar*. Parte para Cambridge e. Ingresa en el Trinity College en julio. Su tío materno, Rvdo. Ayscough había estudiado allí. Ingresa como subsizar para los fellow.

De nuevo tiene problemas de integración por su carácter difícil, sólo tiene un amigo, el pensionista John Wickins. Más tarde recordará de esta época su sentimiento culpable, el desprecio de sí mismo, los autocastigos inflingidos, y una actitud escrupulosa y austera.

Cambridge es entonces una Universidad mediocre con gran peso escolástico. Newton se rebela contra ello como indica que en su cuaderno dedica dos páginas a Descartes.

1662 (21 años) Persecución religiosa en el reinado de Carlos II. Llega a Oxford y Cambridge un espíritu retrógrado. Reconocimiento oficial de la Royal Society. Robert Hooke es elegido “curator” de la Royal.

1663 (21 años) Lee a Euclides dos veces.

1664 (22 años) Titula a sus notas ‘*Questiones quaedam philosophicae*’ (en tono interrogativo) que incluye ‘*Of colours*’: lee la ‘*Geometría de Descartess*, a John Wallis (*Matemática de infinitésimos*), Gassendi (a través de la ‘*Physiología*’ de Charleton), los ‘*Diálogos*’ de Galileo, a Robert Boyle, Thomas Hobbeds, Henry More , la filosofía mecánica. ‘*Tratado de la luz*’ de Descartes. Estudia el movimiento

perpetuo. Deriva de la filosofía mecánica de Descartes al atomismo. Henry More platónico se queja del escaso lugar para Dios en la filosofía de Descartes.

Autodidacta, no destaca en los primeros años de Cambridge. De diez becas concedidas entre los años 1662-63 no le dan ninguna.

En 1664 lucha por ellas y le dan una *scholarship* con derecho a subvención (26 “shillings”). Iba mal preparado pero tenía las influencias de Barrows o Humprey Babington . A partir de entonces se entrega como un poseso al estudio: las comidas y los sueños se hacen escasos e irregulares. Descubre un nuevo Análisis Matemático y la Filosofía Natural. Estudia a Descartes, Galileo y Kepler. Se publican ‘*Le Monde*’, ‘*Experiments and considerations touching colours*’ (Boyle) . Newton es elegido “ scholar “ en el *Trynity* y asiste a cursos de matemáticas de Barrow.

1661-65	Redacta una serie de manuscritos ópticos en su carnet de notas
---------	--

1665 (23 años)	Es nombrado “Bachelor of Arts”. Se publican la ‘ <i>Micrographia</i> ’ (Hooke) y ‘ <i>Phisycomathesis</i> ’ (Grimaldi).
------------------	--

En verano de 1665 llega la peste bubónica a Londres y Cambridge. El 10 de octubre de 1665 la Universidad cierra. (Newton se ha ido tres meses antes).Con el incendio de Londres finaliza la Peste. Los arquitectos Christopher Wren y el polifacético, Robert Hook reconstruyen Londres tras el incendio.

Descubre el teorema fundamental del cálculo que relaciona tangentes (diferenciales) y cuadraturas (integrales).

Ya tiene material de óptica considerable en su carnet de notas.(otro escrito en 1665-66)

Se inician las ‘*Philosophical Transactions*’ de la Royal Society

1666 (24 años)	El <i>annus mirabilis</i> . El 20 marzo 1666 regresa pero en junio de 1666 vuelve a Lincolnshire.
----------------	---

Escribe un opúsculo en oebre 1666 con tres trabajos matemáticos. Descubre el teorema fundamental del cálculo que relaciona tangentes

y cuadraturas Inicia '*Sobre los Colores*'. Empieza a tallar lentes esféricas. Se hace con un prisma y empieza trabajos de óptica y Gravitación. Empieza experimentos de óptica. con un prisma. Ya tiene las ideas esenciales del color.

Se funda la Academia de Ciencias de París con subvención real (Luis XIV).Se publica '*Origin of forms and qualities*' (Boyle).Newton lee por primera vez las '*Philosophical Transactions*'.

- 1667 (25 años) Humprey Babington es nombrado “senior fellow”
En la primavera, abril de 1667, regresa de nuevo a Cambridge.
Es nombrado “ minor fellow” del *Trinity College* examinado por los “seniors fellows” (Un “fellow” era miembro permanente de la comunidad). Elegido en octubre 1667 Nueve meses después obtiene el grado de Magíster en artes y es nombrado automáticamente “fellow professor”. Según los estatutos, los sesenta fellows debían ordenarse en la iglesia anglicana.

- 1668 (26 años) Empieza su telescopio. Hace el Experimentum Crucis con los prismas. Es nombrado “Master of Arts” y automáticamente le hacen “Major Fellow”. Hace su telescopio. Compra tres prismas en febrero

- 1669 (27 años) Se publica '*Experimenta Crystalli Islandici*' de Erasmus Bertholius
Barrow dimite de Lucassian profesor a favor de newton. El 29.10.69 es nombrado “Lucassian profesor of Mathematics” de la Universidad de Cambridge. Da ocho lecturas al año..En 1669 es preceptor de un *fellow communer*. Inicia sus '*Lectiones Opticae*' (lecciones de Óptica)
Describe el 23 febrero 1669 su telescopio reflector. Experiencias serias con dos prismas. Espectro de la luz. Da a conocer su método de fluxiones.

- 1670 (28 años) Publica '*Lectiones Opticae*' 69-70. También trabaja sobre sus anillos con lente de 50 pies de diámetro
Expone la conferencia '*Discours sur le mouvement local avec des remarques sur le mouvement de la lumière*' en Paris.

1671 (29 años) Envía su telescopio a Oldenburg (El primero, de 2 pies largo y 38 aumentos se oxidaba mientras que el segundo, de 4 pies y metal, era más duradero). Oldenburg le felicita por él.

En este año inicia su teoría del éter pues:

- el transporte de una acción que interaccione con el movimiento de las partículas luminosas y lo pueda modificar exige la presencia de un éter.
- La difracción manifiesta una acción a distancia. Recuerda las acciones gravitatorias y no puede propagarse sin la presencia de un medio.
- Newton ve la importancia del éter en la mecánica celeste y busca una parte común con la óptica .

Escribe ' *Tratado del Color* '

1672 (30 años) Se hace "fellow" del Trinity

Carta a Oldenburg 6 febrero 1672 con su teoría de la luz, un ensayo sobre los colores. aparece en los '*Translations*'. Su artículo '*New theory about light and colours*' aparece en '*Philosophical transactions*' en febrero de 1672

Respuesta de la comisión de expertos (Hooke) 15 febrero 1672

Publica su carta a la Royal Society '*Hipótesis explaining the properties of light*'. Críticas de Huygens y Hooke a la semana sobre la corpuscularidad.

Lee a Grimaldi. Propone que la interacción del éter y materia es modulada por ondas de éter que son perturbaciones de éste originadas al paso de la luz .

En su carta de 1672 a Oldenburg, dice ser responsable "*del más extraordinario, si no del más trascendental, descubrimiento de cuantos jamás se habían hecho en torno al funcionamiento de la Naturaleza* ".

Respuesta a Hooke el 11 junio 1672

Oldenburg inscribe su telescopio el 19 de febrero en las *Philosophical Transactions* y lo publica en Europa. Lo conocen los científicos de toda Europa :Cassini, Auzut, Denis en Paris , Huygens en Holanda,...

Ignace Gaston Pardies jesuita frances profesor del colegio Louis le Grand dice que su hipótesis interesante, lo que le molesta. Para Newton es una teoría. Escribe que lo más importante es estudiar primero las propiedades de las cosas y establecer dichas propiedades por medio de experimentos y después elaborar hipótesis.

1673 (31 años) Barrow vuelve a Cambridge como master del Trinity hasta su muerte en 1676. En 1673 recibe críticas de Huygens

1675 (33 años) En su '*Discurso de Observación*' (7 diciembre 1675) enviado por él a la Royal relata su experiencia de anillos. En ella se refiere a la carta a Oldenburg de 21 mayo 1672 .

Carta de Newton a la Royal Society ofreciéndose. Carlos II inaugura el real Observatorio Astronómico de Greenwich. Lo preside Flamsteed.

En carta a Oldenburg publica '*An Hipótesis explaining the properties of ligh discoursed of in my several papers*'.

Carta a Oldenburg. El 13de noviembre de 1675 le informa que tiene una conferencia preparada sobre los colores.

1676 (34 años) Römer descubre que la velocidad de la luz es finita.

Cartas de acercamiento con Hooke

Carta a Oldenburg relativa al Cálculo Infinitesimal.

Lectura en la Royal Society

1677 Leibnitz escribe a Oldenburg sobre sus cálculos

1679 (37 años) Muere Hanna. Newton la cuida hasta el final.
El 28 febrero escribe su carta a Boyle sobre cohesión de los cuerpos, acciones químicas, gravedad y refracción de la luz. Deja la teoría del éter a favor de la de fuerzas atractivas y repulsivas (las acciones a distancia).

1681 (39 años) Construye un telescopio (6 pies) y láminas plano-paralelas.

1682 Leibnitz publica '*Unicum opticae, catoptricae, Dioptricae principium*'.

1684 (42 años) Visita de Newton a Halley. Reemprende investigaciones de gravedad finalizadas en 1680. Leibnitz en '*Acta Eruditorum*' habla de diferenciación. Leibnitz publica su tratado sobre cálculo diferencial. Newton no había publicado nada de matemáticas. Visita de Halley. Tres meses después Halley recibe '*Propositiones de motu*'.

1685 Jaime II sube al trono.

1686 El 28 abril presenta sus '*Principia*' en la Royal Society. Hooke le acusa de plagio. Llega a Londres el Matemático Nicolas Fatio de Duillier el 2 de mayo procedente de Suiza

1687 (45 años) Publica los '*Principia*'. Rompe la actividad científica. Preside la Casa de la Moneda y la Royal Society. Postula un espacio epicúreo vacío que llena con fuerzas. En 1687 entrega los '*Principia*' (2 libros)

1689 (47 años) Comienza el reinado de Willian y Mary (Orange- Stuart). Se usa la bayoneta. Conoce a Huygens. También a John Locke. Es elegido diputado del Parlamento, como representante de Cambridge contra las medidas totalizadoras de Jorge II.
Conoce a Fatio (amigo de Huygens y Leibnitz) de 25 años y se inicia una íntima relación entre ambos.

1690 Fatio le propone la lectura del '*Traité de la lumière*' de Huygens. En 1690. Cambridge entra en crisis. Lo abandona. Reinicia trabajos de óptica .

1691 Muere Boyle.

1692 Empieza el uso de los mosquetes de pedernal.

1693 (51 años) Su año negro .Coge una gran depresión. Rompe con Fatio.

1694 Leibnitz critica el argumento del caldero giratorio en carta a Huygens

1695 Disputas con Flasteed . Newton le pide datos de sus observaciones de los satélites de Júpiter para comprobar si la velocidad de la luz cambia con su color.

1696 (54 años) Entra en la casa de la moneda (*Warden of the Mint*). Resuelve con el método de las fluxiones el problema de Leibnitz .Abandona Cambridge para hacer burocracia. Toma posesión de Intendente de la Casa de la moneda. Resuelve desafío matemático de Bernouilli.

1699 Reaparece Fatio

1700 Leibnitz responde a las acusaciones de plagio de Fatio en las *Acta Eruditorum*

1701 Newton defiende el uso del papel moneda.

1703 Aparece el primer periódico diario de Inglaterra. Muere Hooke a los

67 años. Muerto Hooke, acepta presidencia de la Royal Society

1704 Toma de Gibraltar. Publica '*Optics*' (1ª edición).

1705 Newton es nombrado Caballero (lord). Estalla el conflicto con Leibnitz (J . Keill es su hombre de paja)

1706 Correspondencia de Leibnitz con la princesa Carolina de Gales.

1707 '*Aritmética Universalis*'. No ayuda a Fatio apresado y acusado de profeta y hereje celote .

1710 Leibnitz en su '*Teodicea*' critica la trasnochada idea de la acción a distancia. Se traslada a su nueva casa de Londres en Saint Martin Street . Monta un observatorio en el tejado.

1712 Newcomen inventa la máquina de vapor. Leibnitz critica de nuevo la gravedad como “ fuerza oculta “

1713 Tratado de Utrech. 2ª edición de '*Principia*'.

1714 Jorge I sube al trono. J. Keill rechaza el descubrimiento simultáneo de Leibnitz.

1716 En 1716 resuelve el desafío de Leibnitz del cálculo de *Trayectorias ortogonales de una serie de curvas*. El 16 de noviembre muere Leibnitz.

1717 Postula un nuevo éter muy elástico de partículas muy alejadas entre sí (ver “Queries “21-28)

1718	2ª edición de ' <i>Opticks</i> '
1719	Muere el astrónomo Flamsteed, director del Observatorio de Greenwich. Le sucede Halley
1721	3ª edición de ' <i>Opticks</i> '. Comienza un sistema de gobierno con gabinetes ministeriales. Newton en " <i>De motu</i> " discute el espacio y tiempo absolutos
1725	Se completa el catálogo de estrellas del astrónomo real (y enemigo suyo), Flamsteed.
1726	Aparece la 3ª edición de los ' <i>Principia Mathematicae</i> '.
1727	Muere sin pedir los ritos finales. Es enterrado en la abadía de Abbey
1730	Aparece la 4ª edición inglesa de <i>Opticks</i>

5.2.5 El paradigma de la teoría los medios

Hijo de un diplomático amigo de Descartes y Mersenne, conocedor de la obra de Bacon, el brillante Christiaan Huygens (1629-1695) destaca desde niño por sus dotes intelectuales y adquiere una sólida formación científica en un ambiente ilustrado y cosmopolita (su padre le llamaba *el pequeño Arquímedes*). Tiene trece años cuando muere Galileo en la costa de San Giorgio, Descartes escribe sus '*Principios de Filosofía*' y Newton acaba de nacer. Ni fundador pues, ni pionero, es sin embargo el profundo geómetra que hizo posible la constitución de una física matemática.



Es el autor como Newton, de dos libros clave para entender la mecánica y la óptica de su siglo: el '*Horologium Oscilatorum*' (París 1673), en el que estudia las caídas isócronas y las fuerzas centrífugas y el '*Traité de la Lumière*' (Leyde, 1695) ,en el que propone una teoría basada en pulsos no periódicos de la luz , un estudio mucho más profundo que el de Newton de la birrefringencia de la luz en los cristales de calcita y un ensayo sobre la causa de la gravedad.

Conocidos sus trabajos de *mecánica* acerca de los choques y los de *dióptrica*, que le permiten construir (junto con su hermano) un telescopio refractor con el que observa los anillos de Saturno y la nebulosa de Orion, es llamado a Francia en 1666 por el Barón de Colbert para presidir la recién fundada Académie Royale des Sciences. Su estancia en París en el período 1666-85 fue realmente fructífera: escribe en 1673 su famoso '*Horologium*', construye un reloj de péndulo con trayectoria cicloidal, construye en 1675 un reloj con resorte en espiral, cuya paternidad le disputa ¡ cómo no !... Robert Hooke, y esboza en 1677 la mayor parte de su '*Traité de la Lumière*'.

Motivos de salud y la revocación del permisivo Edicto de Nantes, le obligaron a regresar a la Haya por su condición de protestante, de donde sólo saldrá una vez para viajar a Londres (1689) en donde conocerá a Newton.

Huygens rivalizó con Newton y Leibnitz en el dominio de la matemática de su tiempo, y gozó del respeto y amistad de toda la comunidad científica de la época Su obra escrita es muy elaborada, lo que le impidió ser más prolífico. Si bien en Física discrepaba abiertamente de las analogías de Descartes, heredó su modelo mecánico de choques de bolas que explica las interacciones y la constitución de la materia.

Ciñéndonos a nuestros tópicos de la óptica, citaré sólo los principios físicos que propone este autor para la comprensión de los fenómenos luminosos, remitiendo al lector más interesado a su obra original, más clara que la de Newton.

Ondas secundarias en un éter continuo

Durante su estancia en la Academia de las Ciencias, el hombre de su equipo Römer, descubrió que la velocidad de la luz es finita, lo que corrige el error de Descartes en su creencia de la luz se transmite instantáneamente.

Su experiencia de que la luz se asocia a fuentes de fuego o sustancias incandescentes, le lleva a explicar que la luz de la llama sería producida por

... la agitación de partículas que nadan en una materia más sutil que las agita con gran rapidez y las hace chocar contra las moléculas del éter, que las rodean y que son mucho más pequeñas que ellas.

Cada punto de la llama o de un objeto incandescente, al ser perceptible, estará en movimiento. Además, si recogen los rayos de un haz con una lupa que incide en un papel blanco, es posible que éste comience a arder. Por ello define la luz (Huygens, 1992) como:

...un movimiento de la materia que se encuentra entre nosotros y el cuerpo luminoso. Repugna al sentido común que este movimiento sea transporte de materia proveniente del objeto, luego debe suceder de otro modo.

Un símil con el sonido le dice que la luz debe propagarse como ondas esféricas sucesivas y no periódicas, a través de una materia intermedia entre el foco y el observador que no puede ser el mismo medio que transmite los ruidos, pues en una campana de cristal al vacío, se transmite luz pero no sonido. Esta materia, que llamará “éter” está compuesta de partículas muy duras de igual tamaño, pequeñas y elásticas, que están formadas a su vez de otras aún más pequeñas. La elasticidad se debería a una materia muy sutil que las atraviesa de todos lados y se mueve a través de ellas.

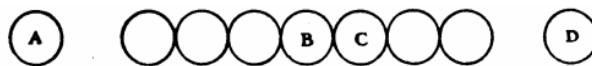


fig . 2.64 Modelo de bolas etéreas de Huygens

En un modelo lineal, son los impactos transmitidos sucesivamente desde A a D los que transmiten la perturbación (la luz en nuestro caso), pero aunque las partículas de éter no estén en fila, al igual que las bolas de un billar americano, el impacto de A contra el grupo, produce que todas ellas se muevan dejando a la B en reposo.



fig . 2.65

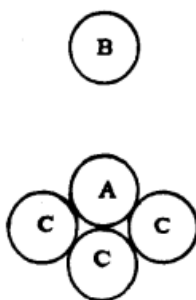


fig . 2.66 La bola B transmite su impulso a las demás tras un impacto

Este movimiento que trasmite una pequeña vibración a cada partícula del medio, se genera en los puntos individuales A, B, C de la llama, que se refuerzan produciendo un frente de onda común que no tiene en absoluto por qué ser periódico. Ello explica que luces provenientes de focos lejanos, lleguen sin debilitarse hasta nuestros ojos. Aunque una partícula pueda servir para varias ondas, provenientes de distintas direcciones. Si a eso se añade que de cada punto pueden nacer infinidad de ondas en el menor tiempo imaginable, podremos entender que su acción sea aún más sensible.

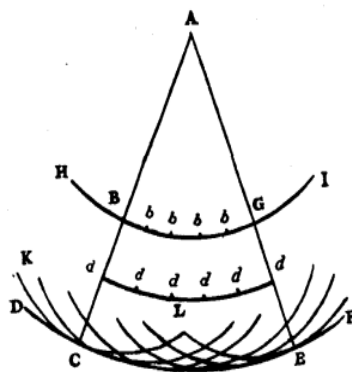


fig . 2.67 Frentes de onda no periódicos

Pero su aportación más interesante y paradójica, surge cuando explica la propagación de un frente DCF generado en A. La partícula B engendra su propia ondita KCL, que solapa en el punto C con la principal DCF proveniente de A, la G la LEF en el mismo instante y lo mismo ocurrirá con las *bb*, *dd*, etc.

La conjunción de las ondas secundarias en el arco DCF explica que sólo éste sea observable y que las pequeñas ondas sólo tendrán intensidad apreciable en DCF y no en puntos como el K, L ó F.

Notaremos que los puntos ABC están en línea recta, lo que implica que el fenómeno sólo es apreciable en esta dirección.

Si hubiera una abertura BG entre los obstáculos opacos BH y GI, el haz de luz estaría limitado por los rayos AC y AE, y las perturbaciones en los puntos externos al cono no serían apreciables.

Landsberg (1978) resume este principio :

... Cada punto al cual llega la perturbación luminosa es a su vez un centro de ondas secundarias; la superficie que en determinado momento de tiempo contornea estas ondas secundarias señala la posición en este momento del frente de onda que verdaderamente se propaga.

¿Cómo es que llegado a este punto Huygens no fuera capaz de relacionarlo con la difracción de Grimaldi que había estudiado con intensidad? ¿Debemos culpar nuevamente a su excesivo rigor que le impedía abordar temas no suficiente claros para él?.

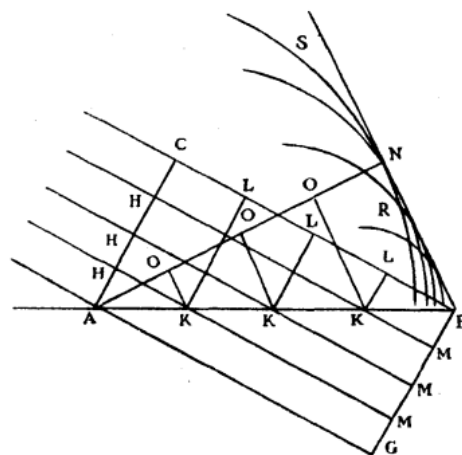


fig . 2.68 Reflexión con el modelo de Huygens

Huygens fue consciente de la fecundidad de este principio que le servía para explicar el mecanismo de la reflexión y refracción de la luz de igual modo, añadiendo el supuesto de Fermat, de que la velocidad de propagación de ésta es menor en medios más densos que en el aire.

Es conveniente insistir en que para su exposición, no se necesitan ondas periódicas como él mismo expresaba, luego CA, LK, etc. no son frentes de onda equidistantes, como hoy vemos en la mayoría de los textos, una longitud de onda idéntica, sino que son el camino del mismo frente de onda a intervalos de tiempo iguales.

Supuesto un frente plano CHHHA (fig. 2.74), procedente de un foco muy lejano, que llega a una superficie pulida de metal o vidrio, pasando por las sucesivas posiciones CA, LK, ... mientras que la perturbación en C sigue su camino sin interrupción hasta el punto B en un tiempo arbitrario

T, las discontinuidades en A y K provocan unas onditas secundarias cuyo frente en dicho tiempo, estará a una distancia AN.

Del mismo modo los puntos HHH, llegarán a intervalos iguales a la superficie AB a puntos KKK que, a su vez, emitirán pequeñas ondas de radios KM decrecientes que se propagarán en el aire.

Si se traza la tangente a todas las ondas secundarias se obtiene el frente reflejado BN.

Del análisis de los dos triángulos ACB y AHB se deduce su igualdad pues tienen un ángulo recto y la hipotenusa AB común. De ello se deduce la igualdad del ángulo de incidencia NAB del rayo y del de reflexión CBA .

Es más desconocida pero no menos interesante su demostración de que los rayos incidente y reflejado están en un mismo plano:

En efecto, puesto que no tiene entidad física un haz plano de luz por estrecho que sea, supongamos un haz cilíndrico (fig. 2.69) cuyos frentes de onda son círculos de diámetro CH. El pincel que llega a la superficie reflectante, intersección a dicha superficie en una elipse de eje AB que se convertirá en un foco de ondas secundarias. El citado principio indica que los puntos que inciden en AB, emiten según BN, y los que lo hacen en la periferia de la elipse AB, lo hacen en el perímetro del círculo BH.

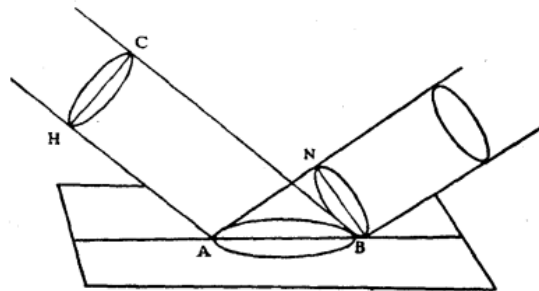


fig . 2.69 El plano formado por los rayos incidente, reflejado y la normal es común

El plano que paso por medio de los círculos y las elipse indicada, contendrá por ello los ángulos de incidencia y reflexión.

La refracción en medios transparentes

Huygens opina que la materia está formada por partículas entre cuyos huecos está el *éter*. Las ondas incidentes, se propagan tanto a través de las pequeñas partículas de *éter* como de las grandes que forman el nuevo medio. Se podría argumentar que las pequeñas imprimen poca energía a las grandes, pero esta objeción desaparece si se tiene en cuenta que las grandes están a su vez formadas de varias pequeñas. Además, puesto que la elasticidad del medio será menor que la del aire, la velocidad de las ondas incidentes será menor. Sean c y v la velocidad de la luz en ambos medios

Para explicar el mecanismo de refracción aplicando estos principios, repite el razonamiento anterior de las ondas secundarias:

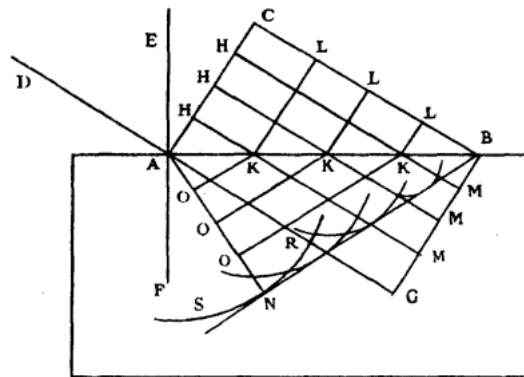


fig . 2.70 La ley de Snell con el modelo de Huygens- Fermat

El frente AC, uno de cuyos rayos incidentes es la línea DA, con ángulo de incidencia CBA, se interrumpe al llegar a la superficie de discontinuidad AB. Supongamos que C alcanza la posición B al cabo de un tiempo T y que a partir de A la onda viaja más lenta mientras que H,H,H,C siguen su velocidad normal hasta llegar a K,K,K y B desde donde reemiten hacia el segundo medio.

La envolvente formada por las correspondientes ondas secundarias, forma al cabo del mismo tiempo T , el frente BN, el lugar donde la perturbación global será máxima. AN será pues el rayo refractado con ángulo de refracción ABN.

En la nueva situación se observan dos triángulos rectángulos, el ACB y el ABN a los que se pueden aplicar las relaciones

$$\text{sen } i = CB/BA \quad \text{sen } r = AN/AB$$

De donde :

$$BA = CB / \text{sen } i = AN / \text{sen } r$$

Como $CB = c T$ $AN = v T$ se deduce que la conocida ley de Snell :

$$\text{sen } i / \text{sen } r = c / v = n$$

Donde n es una constante que se define como índice de refracción del segundo medio relativo al primero.

La refracción así entendida explica el crepúsculo

Los desarrollos anteriores se aplican a medios homogéneos, pero en la atmósfera terrestre, la densidad del aire no es homogénea, y la velocidad de los puntos de un mismo frente es menor en las zonas más densas, lo que explica lo paradójico de algunas observaciones.

Huygens desarrolla un espacio a estos temas (fig. 2.71), comenzando el relato de que si se fija un telescopio en una posición que apunte por ejemplo, al campanario de una iglesia, en el transcurso de un día cálido, su imagen aparece y reaparece al cabo de las horas.

Continúa relatando la observación el extremo A del campanario, que emite ondas esféricas en todas direcciones recorriendo espacios distintos en tiempos iguales, puesto que el aire se enrarece en las capas altas de la atmósfera y la luz alcanza en ellas mayor velocidad.

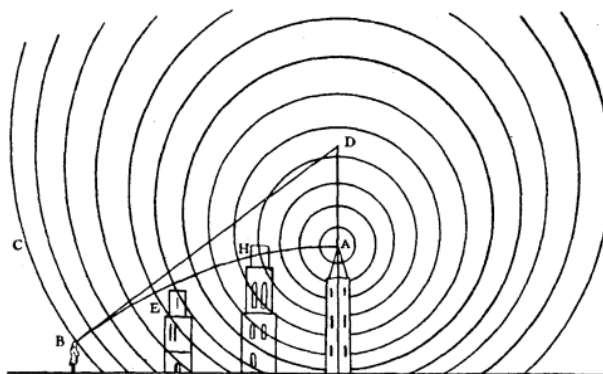


fig . 2.71 Refracción de la luz en distintas atmósferas

Como consecuencia de ello, el rayo visual se va curvando en su camino hacia el espectador B, que interpretará erróneamente en el punto D la posición de A.

Unas líneas después relata la aparente elevación del sol en los crepúsculos.

Supuesta la Tierra la esfera AB y el límite superior de la atmósfera la esfera CD, un rayo solar procedente del punto E casi horizontal se van curvando en su camino hasta el espectador A y provoca la ilusión que su imagen aparezca en el punto F.

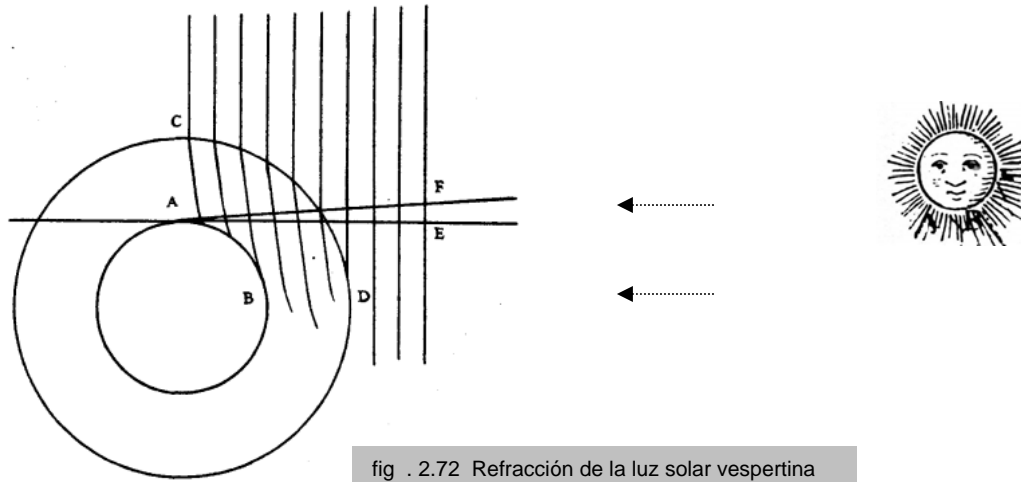


fig . 2.72 Refracción de la luz solar vespertina

5.2.6 Repercusiones europeas de ambas teorías

La obra de Huygens es menos extensa que la de Newton aunque su intuición física se aproxime más a la realidad de la luz. Sin embargo no se debe frivolar anteponiendo la caricatura de ambas teorías. Como hemos visto, para la Teoría de los Medios, sus ondas no eran periódicas, sus ondas secundarias no explicaban la difracción en la sombra de los obstáculos y respecto a la naturaleza del color, Huygens confiesa abiertamente su desconocimiento total. Las propuestas de Newton en su artículo de 1672, no le convencen como modelo, aunque reconoce la originalidad de sus experiencias.

La polarización de la luz que se produce cuando un rayo luminoso que llega a un medio de calcita o cuarzo cristalizados, y se desdobla en dos rayos distintos, la explica suponiendo que al incidir la luz externa en el medio, se originan dos clases de onda, esférica y esferoidal respectivamente, viajando a velocidades distintas como consecuencia de las perturbaciones de la onda incidente sobre las partículas etéreas internas, y las del propio medio. Como a Newton y Hooke, no se le ocurre ni remotamente la posibilidad de ondas transversales, luego su artículo se queda en un fantástico ejercicio geométrico, cuya dificultad desaconseja aquí su tratamiento.

Durante casi un siglo el modelo de emisión se impuso al de los medios. Ambos tenían aciertos y lagunas, y el segundo era aún más intuitivo, pero tras la aparición de los '*Principia*', Newton adquiere en su época al menos tanto prestigio como Einstein en la nuestra y resultaba difícil que los objetores encontrasen eco en la comunidad científica. Como si de la escuela de Copenhague se

tratara, mientras que Huygens buscaba con rigor las causas del fenómeno, Newton prefería descubrir propiedades del fenómeno, su tratamiento matemático y predecir medidas, mejor que describir hipótesis.

A la muerte de Newton, su sombra fue demasiado grande para todo un siglo de científicos. En su afán de reconocer la intervención divina, había conseguido el efecto contrario, al cambiar un Universo lleno de misterio, por un gran engranaje en el que todo estaba previsto, regido por un sencillo principio de atracción entre masas y la ley de la Gravitación Universal.

El camino de '*Opticks*' fue algo distinto: el fenómeno a explicar era más difícil y la metodología elegida distinta, deductiva en un caso e inductiva en otro. Menos acabado que el primero, es un libro con cantidad de experimentos recogidos a lo largo de treinta años, desarrollos matemáticos sencillos, e hipótesis abiertas que son lo más interesante del libro. No tenía en mi opinión la entidad suficiente para desbancar totalmente las tesis ondulatorias y sin embargo fue el paradigma que triunfó rápidamente en Europa.

Para explicar pues que durante más de un siglo las tesis emisivas fueran aceptadas en todos los ambientes científicos, hay que tener en cuenta los factores sociológicos que a menudo perturban lo que sólo debía ser un proceso de búsqueda de certezas. Las claves de su aceptación en tan corto plazo hay que buscarlas en los sucesores capaces de influir en la opinión de sus contemporáneos. Un rápido repaso de sus defensores y adversarios, nos puede aportar nueva información.

Edmé Mariotte, un benedictino perteneciente a la Academia Real de las Ciencias, es el autor del '*Traité de la Nature des Couleurs*' (Mariotte, 1681) repite descuidadamente el *Experimentum* de Newton haciendo incidir un rayo de luz violeta en un segundo prisma. La obtención de los colores amarillo y rojo lo le lleva a descartar las tesis newtonianas. Su muerte en 1684, supuso un desinterés en los círculos científicos hasta la aparición de '*Opticks*'.

A finales del siglo XVII, se consolida en Francia un grupo de científicos liderado por el influyente Nicolás Malebranche, que integra figuras de primera fila como el Marqués de L'Hôpital, Charles-René Reyneau, Pierre de Varignon y otros. Les caracteriza un sólido dominio de las nuevas matemáticas de Leibnitz y Bernouilli. El sacerdote Malebranche, suponía la existencia de un éter de partículas elásticas en lugar de las rígidas de Descartes y la interacción mecánica entre partículas que le incluye en la categoría de los neocartesianos (como Huygens y Leibnitz). Tras la lectura de '*Opticks*' sobre 1707 queda impresionado por la originalidad de sus experiencias cambia sus tesis sobre la luz en la sexta edición de su texto '*La recherche de la verité*' aparecido en 1712. En él asocia cada color a una vibración de frecuencia distinta donde hay un éter en una clara analogía a los tonos sonoros.

Aunque la censura contra Galileo estaba aún reciente, Italia estaba libre de la influencia cartesiana, lo que permitió una mejor acogida a Newton. Francesco María Zanotti, secretario de la italiana Accademia delle Scienze en 1720 repitió el experimento crucial con prismas de mala calidad, y obtuvo resultados distintos del original, lo que supuso que los oponentes de Newton se vieran reforzados. Un estudiante suyo, Francesco Algarotti repitió en 1728 y 1728 varios experimentos con un nuevo prisma, obteniendo resultados que confirmaban la autenticidad de los relatos de Newton. Algarotti, es el autor del texto ‘*Newtonianismo per le Dame*’ que populariza allí a nuestro autor

En febrero de 1706 el prestigioso periódico alemán, ‘*The Acta Eruditorum*’, publica un respetuoso y extenso resumen de ‘*Opticks*’ cuyo autor fuera probablemente Leibnitz. Su análogo en Francia, el mencionado ‘*Journal des Savants*’ refiere favorablemente los logros del telescopio reflector, su tratamiento del arco iris y de los colores.

En verano de 1715 algunos sabios franceses, J. T. Desaguliers ente ellos, se desplazaron a Londres para observar un eclipse solar, y aprovecharon para asistir a la repetición de las experiencias de ‘*Opticks*’ en la Royal Society. Su testimonio al regreso al continente fue uno de los mayores apoyos a las tesis emisionistas y fomentó la repetición de nuevas sesiones en la Academia Francesa.

Los tímidos apoyos de estos encuentros se establecieron formalmente gracias al filósofo francés Voltaire que en su exilio en Londres durante los años 1726-29, contactó con varios amigos de Newton y asistió a su funeral en la Abadía de Westminster. A su regreso lo hizo como un incondicional admirador de la obra y metodología de trabajo de Newton.

Escribió en 1734 ‘*Lettres Philosophiques*’ (‘*Les Anglais*’) cuyo capítulo XVI es un resumen de ‘*Opticks*’. En él destaca que las partículas de luz obedecen a las leyes mecánicas consecuencia de las fuerzas de corto y largo alcance similares a las gravitatorias. Subraya la presencia de una nueva filosofía natural en la Ilustración y no una basada en causas de imaginarias inventadas por la razón.

Un apoyo de peso, lo prestó la amante de Voltaire, Madame Chatêllet, gran matemática traductora al francés de los abstrusos ‘*Principia*’, que aglutinó a gran cantidad de intelectuales lo que consiguió que las tesis newtonianas se impusieran prácticamente en la totalidad de los círculos cultos europeos.

Como vemos, la razón última por la que su paradigma óptico desbancara al de Huygens, fue el prestigio de genio que le merecieron sus ‘*Principia*’ y el recurso a la autenticidad de las experiencias referidas. Los intelectuales implicados, más mediocres que los protagonistas de la

disputa, no se cuestionaron si éstas eran argumento suficiente para excluir otras teorías, y a poco éste devino el paradigma dominante hasta la segunda decena del siglo siguiente.

Sólo algunas voces como la del matemático suizo Leonhard Euler, referencia del inglés Thomas Young, se atrevieron a disentir con distinto acierto, iniciando el verdadero desarrollo de la Óptica física.

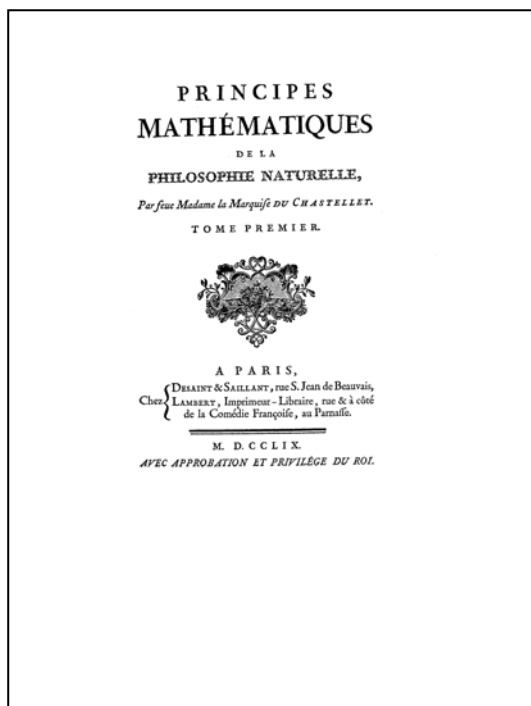


fig. 2.73 La traducción francesa de los Principia

5.3 LA ECLOSION DE LA TEORIA DE LOS MEDIOS

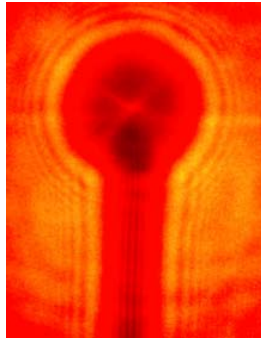


fig .3.1 La mancha de Poisson-Arago

5.3.1 Hacia una óptica sin “fits”

En nuestra lectura anterior, hemos visto, que tras tímidas resistencias, las tesis corpusculares dejaron relegada al olvido la ondulatoria *Teoría de los Medios*. La abrumadora colección de experimentos de ‘*Opticks*’ así como el cuerpo matemático que soportaba sus tesis, creó un nuevo estilo de hacer ciencia, que impregnó toda la filosofía natural del ilustrado siglo XVIII. Como sucede casi siempre, sus discípulos resultaron ser mucho más dogmáticos y reacios al cambio que el maestro Newton. Recordemos que sus *fits* pretendían reconciliar la periodicidad con la corpuscularidad de sus anillos, recuerdan lejanamente a la dualidad actual de la luz (Cohen, 1971).

‘*Opticks*’ hacía aguas por muchos sitios: sus *fits* tenían longitud variable, según que la luz incidiera perpendicularmente a la superficie o inclinada, su difracción se basaba en observaciones imprecisas y se recurría a la existencia del éter a voluntad. Para muchos, a diferencia de lo que ocurre con los siempre actuales ‘*Principia*’, ‘*Opticks*’ fue sólo un libro de época con una prodigiosa cantidad de experiencias que había que sistematizar en más profundidad.

Tras las tímidas propuestas renovadoras del matemático suizo Euler, el siglo XIX se inicia con las peculiares interpretaciones que hacen del color el poeta alemán Goethe, o los filósofos Hegel y Schopenhauer, y las del científico Thomas Young de otro, que encuentra en La Royal Society inglesa la caja de resonancia de la nueva óptica. En Francia, una nueva generación de jóvenes que habían aprendido a aplicar con éxito el cálculo diferencial e integral de Newton, estaba en condiciones de dar el salto necesario para que las matemáticas fueran el lenguaje de toda física

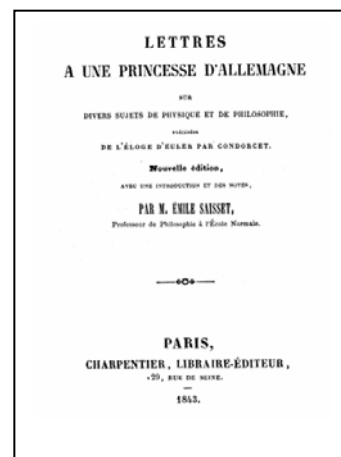
que se preciase de un cierto rigor y supieron aprovechar la primera oportunidad. Lagrange en Mecánica y Fresnel con la Óptica fueron los ejemplos.

La nueva óptica explicaba los fenómenos de periodicidad y polarización de la luz, superaba los oscuros *fits* con la longitud de las nuevas ondas y sus predicciones tenían concordancia muy precisa con las medidas observadas, pero no podía justificar la influencia de las corrientes e imanes en los haces de luz que Faraday acababa de descubrir ni postular un origen para la creación de esas ondas. Poco más tarde el genio de Maxwell dio la síntesis que parecía la definitiva...(Buchwald, 1986)

Los heterodoxos



En la suiza ciudad de Basilea en 1707, nace el matemático más prolífico de la Historia, Leonhard Euler. Discípulo de Bernouilli, es invitado a la corte rusa de San Peterburgo. Más tarde es invitado a la corte Alemana por Federico el Grande y es allí donde publica en 1746 '*Nova Teoría lucis et coloribus*' y en 1762 a la manera de las clásicas enciclopedias divulgadoras, el resumen de sus concepciones físicas del mundo, las '*Lettres à une princesse d'Allemagne sur divers sujets de physique et de philosophie.*' (Euler, 1843) procurando que sus contenidos fueran asequibles para la joven princesa Anhalt Dassau, sobrina del rey de Prusia, destinataria del texto. Sus dos textos tratan de temas tan diversos como la velocidad, la música, propiedades del aire, el calor, la luz, astronomía, magnetismo, óptica geométrica, visión, anatomía ocular, gravedad, mareas, origen de la naturaleza de las fuerzas... ¡ incluso disquisiciones acerca de la naturaleza del alma, la libertad, el sentimiento, la memoria, o las mónadas de Leibnitz !



Aunque sus ideas respecto a la óptica no tuvieron acogida en su época, es el precursor de las nuevas tesis ondulatorias. Sorprende el carácter especulativo del texto, y la energía con la que defiende su modelo, para el que presenta escaso apoyo experimental, lo que aún da más valor a lo acertado de sus diagnósticos.

Así por ejemplo, en su carta XVIII critica las tesis emisionistas, pues de ser ciertas, el sol habría desaparecido tras millones de años de actividad. Atribuye a Newton la defensa de un vacío interestelar, pues de otro modo los astros encontrarían resistencias a su movimiento. Como no existe ningún medio (ni siquiera éter) el único modo de viajar la perturbación luminosa, sería a través corpúsculos materiales. Recordemos lo necesario de la búsqueda de un cierto rigor en la

cita a los autores, pues en contra de lo que dice Euler, Newton sí se refiere de modo intermitente a la existencia de un éter.

Es de destacar que en su carta XXVII que titula ‘*Sobre la Naturaleza de los colores*’ no es nada condescendiente con las ideas del maestro, y ve sin embargo evidentes las suyas en las que defiende que la luz está formada por las vibraciones que transporta el éter, y que cuando incide sobre los cuerpos los hace vibrar a la frecuencia de la radiación (o radiaciones incidentes) siempre que sean receptivos a ellas. Curiosamente, presenta la fosforescencia como una confirmación de que es posible excitar vibraciones de distinta frecuencia a la incidente. Se inspira en la analogía con las ondas sonoras y la idea de resonancia de los instrumentos musicales como respuesta a una nota incidente. En sus cartas a la princesa alemana lo expresa como sigue:

...Los newtonianos ponen el color solamente en los rayos. Otros pretenden que el color sólo existe en el sentimiento (es el mejor modo de cubrir su ignorancia). Su Alteza se dará cuenta fácilmente que estas aparentes sutilezas no son más que banalidades. Cada color simple está ligado a un cierto número de vibraciones que se llevan a cabo en cierto tiempo, de manera que un cierto número de vibraciones en un segundo, dará el color rojo, otro el amarillo,...

...El paralelismo entre la luz y el sonido es tan perfecto que se sostiene incluso en sus mínimas circunstancias. Cuando yo alegaba que el fenómeno de una cuerda tensa, que podría ser agitada por el ruido de algunos sonidos.

...Ocurre exactamente lo mismo con la luz y los colores, ya que los distintos colores responden a los diferentes sonidos de la luz.

...De ello deducimos que para conseguir que un cuerpo brille con un cierto color, hace falta que los rayos que inciden sobre él tengan el mismo color, puesto que los rayos de otros colores no tiene la posibilidad de agitar las partículas de este cuerpo,...(Euler, 1843)

En esta definición del color, vemos que la luz blanca sería una combinación de las distintas radiaciones monocromáticas.

Más adelante, en su carta XXIX, ‘*De la transparencia*’, responsabiliza al espesor de las paredes del grado de transparencia que oponen a la radiación incidente, comparando su comportamiento con el del sonido.

Podemos en fin, decir que las premoniciones de Euler fueron geniales pero al estar faltas de pruebas concluyentes tuvieron poca repercusión en la comunidad científica, pues en cierto modo eran una nueva versión de las derrotadas teorías ondulatorias. Su impacto quedó reducido al mundo de las Matemáticas. Requerido a Rusia, muere allí en 1803.



fig . 3.2



Posteriormente, el adalid del movimiento romántico, Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832), dedicó gran parte de sus energías a un tratado sobre el color en el que desautorizaba con prepotencia las tesis del color newtonianas. Reivindicando a Descartes, aseguraba que el color se produce como una mezcla de luz y oscuridad (Goethe, 1982; Sepper, 1988)

Aunque sus afirmaciones acerca de la naturaleza de la luz, de las que se sentía tan orgulloso, son claramente erróneas, es el fundador de la teoría psicológica de la percepción del color que el americano Land retoma en los recientes años cincuenta. Esta escuela afirma que además de la longitud de onda de la radiación incidente, el cerebro registra el color de los objetos ayudado de otros estímulos subjetivos de la percepción, como lo son el contraste con colores próximos.

Su rueda del color difiere de la de Newton en que sólo propone seis colores de extensión idéntica y uno de ellos (el magenta) no es espectral. Cada color se opone a su complementario. A pesar de los errores científicos en su concepción del color, su rueda sigue teniendo más uso que la de Newton en el trabajo de artesanos gráficos, curtidores de pieles, etc. Los colores complementarios interpretan las sombras coloreadas o las post-imágenes que vemos cuando tras observar una imagen brillante de determinado color y cerrar los ojos, el color complementario persiste en los pigmentos oculares tras algunos segundos.

Además las sensaciones de armonía o los estados de ánimo que provoca su visión tienen una raíz fisiológica.

... Cuando el ojo ve un color, se excita de inmediato, y es su naturaleza, espontáneamente y de necesidad, producir otro de inmediato, con el que el color original comprende la totalidad de la escala cromática. Un color simple, excita por una sensación específica, la tendencia a la universalidad. En esto reside la ley fundamental de la armonía de los colores. (Goethe, 1982)

Pero su reto fue aún de mayor calado, pues también discute la epistemología científica y se atreve a una nueva alternativa. Mientras que Newton representa la escuela del experimento guiado por la teoría cuya expresión es el *Experimentum Crucis* que intenta decidir entre dos hipótesis competidoras, que Karl Popper (1959) resume, diciendo que:

... El teórico expone cuestiones definitivas al experimentalista, y éste, mediante el experimento, intenta conseguir una respuesta definitiva a esta cuestión y no a otras. La teoría domina pues al experimentos, o desde su diseño inicial hasta los retoques finales en el laboratorio.

La otra escuela, la de “*experimentación exploratoria*”, despreciada por los filósofos de la Ciencia, no presupone de antemano ningún modelo, es la seguida por Goethe.

...Consiste en una variación sistemática de las condiciones para descubrir la que es necesaria o influye en el fenómeno que se estudia. Su meta es indagar toda la complejidad de un campo, y desarrollar simultáneamente nuevos conceptos y categorías que permitan un ordenamiento básico en esta multiplicidad. Los experimentos y los conceptos, se “codesarrollan”, reforzándose o debilitándose mutuamente.

5.3.2 El último sabio universal

Thomas Young (1773-1829), El hombre que junto con el francés Champolion descifró en la piedra Rosetta el lenguaje de los jeroglíficos egipcios, fue un niño precoz de familia acomodada. A los dos años podía leer sin problemas, a los seis leía la Biblia, a los 16 ya conocía ‘*Los Elementos*’ de Euclides, así como ‘*Opticks*’ y los ‘*Principia*’ de Newton (1790). En 1783, siendo aún estudiante de medicina, ya interpretaba correctamente el proceso de acomodación del ojo.



Tras finalizar la carrera de medicina de modo brillante, para obtener un “*degree*”, Young expone en 1796 en Göttingen un trabajo sobre la voz humana porque le suponía un reto más interesante que los temas médicos. Entusiasmado con el tema, prosigue con él en Cambridge durante tres años y en 1799 presenta ‘*Outlines of Experiments and inquiries respecting sound and light*’ que lee después en la Royal Society (Young, 1800) donde demuestra una erudición exhaustiva en sus referencias Lagrange, Euler, Chadli, Taylor, McLaurin, Bernouilli, Newton y Venturi (Cantor, 1970).

El principio de interferencia

Pocos principios han sido tan fecundos y elegantes en nuestra ciencia, pero también pocos han supuesto tantos intentos sucesivos hasta llegar a su formalización definitiva. Gracias a él, se explican los colores policromados de las alas de las mariposas, de las plumas de los pájaros, de las manchas de aceite sobre la carretera, de la superficie de algunos aceros, de las películas de jabón, etc. Pero además de un precioso espectáculo, este principio se aplica en las más sofisticadas tecnologías ópticas para medir tanto distancias microscópicas como estelares.

Ya en su primer texto recoge el viejo problema del cruce de dos miradas, formulado por Huygens que sólo podría explicarse desde una concepción ondulatoria de la propagación, cuando dice que:

...no hay nada más difícil de explicar que el hecho de que cuando dos miradas se enfrentan, cada sujeto perciba al otro con nitidez, a pesar de que él también esté emitiendo perturbaciones luminosas... (Huygens, 1992)

De sus experiencias y lecturas de Euler, Young comienza a asentar las bases de que la luz no puede tener carácter de corpúsculo pues las explicaciones de los emissionistas sobre la reflexión parcial y las medidas de que la velocidad de la luz en el aire era independiente de su intensidad le parecían sumamente endebles (Cantor, 1984)

En el capítulo ‘Of the coalescence of musical sounds’ aplica el principio de interferencia al sonido para interpretar las pulsaciones (“beats”). El principio de las interferencias era un tema conocido pero confuso desde tiempo antiguo. De hecho Newton ya habla de él veladamente en sus ‘Principia’, para explicar el raro fenómeno, contado por viajante inglés Davidmore, de que en el golfo de Tonkin, próximo a Hanoi (Vietnam), la marea sólo ocurría una vez al día,

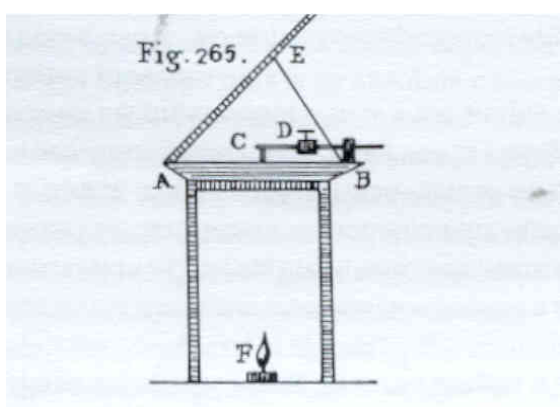


fig . 3.3. Cubeta de ondas de Young



fig . 3.4. La bahía de Batsha

45. Las obstrucciones de los lechos y las costas dan lugar a varios fenómenos como que el mar fluya una sola vez al día. También puede ocurrir que la marea se propague desde el océano hacia un mismo puerto por diversos canales, pasando por unos más deprisa que por otros, en cuyo caso, una misma marea, dividida en dos o más sucesivas, puede combinar nuevos movimientos de diversa índole. El puerto de de Batsha, en el reino de Tonkin, (latitud 20° 50' Norte), nos proporciona un ejemplo. En dicho puerto, las aguas se estancan el día siguiente al paso de la Luna sobre el ecuador; cuando la Luna declina hacia el norte, la pleamar y la bajamar no se producen dos veces al día, como en otros puertos, sino solamente una

..Hay dos entradas a este pequeño puerto desde el océano: la más directa y corta entre la isla de Hainan y la costa de Quan Tung una provincia de china, y la otra entre la misma isla y la costa de Cochin, y la marea se propaga más rápidamente hasta Batshaw por el paso más corto (Newton,1982).

Newton lo interpretó como principio de composición de movimientos sin darse cuenta del carácter ondulatorio de las mareas, pero el avance de Young fue su identificación como fenómeno periódico, aplicación al punto de intersección las ondas mecánicas o luminosas.

Es muy probable que Young se inspirara en estas líneas para aplicarlas a la interpretación de los fenómenos del sonido, pero el tema no era fácil como demuestran sus sucesivos titubeos. De sus experiencias con una cubeta de ondas con agua, hoy de uso común en los laboratorios escolares, y de sus observaciones tras el impacto de piedras sobre superficies acuosas en los canales de Cambridge (Mollon, 2002), obtuvo la evidencia de que el principio de superposición explica bien las interferencias en este medio, siempre que la amplitud de las ondas no fuera excesiva. Podemos especular que lo aplicase a la interpretación de los anillos de Newton y a continuación al sonido, o que fuera el estudio de las interferencias sonoras el que le llevó a las de luz. Para algunos autores, el tema no está claro.

La onda sonora es longitudinal y no parece tan inmediato trasladar a ésta las propiedades del agua. La siguiente dificultad era el explicar porqué se perciben con claridad dos sonidos que se cruzan en una habitación al ser emitidos por focos distanciados.

Los efectos de interferencia se perciben de dos tipos. De un lado, la interferencia espacial es el fenómeno cuyo más claro exponente es el tubo de Quincke, mostraba que ondas de igual frecuencia interfieren según que el camino que recorran desde su foco sea un número entero de longitudes de onda, formando máximos, o un número impar de semilongitudes de onda para los mínimos, lo que un observador situado en B percibe como debilitamientos o refuerzos de la misma nota emitida en A según se cambia el recorrido de la rama móvil C.

Young propuso que las ondas se superponen en su intersección pero inmediatamente continúan su camino sin perturbarse. Ya percibió cualitativamente el fenómeno, al comprobar que el sonido de

un diapasón era distinto según que colocásemos sus ramas paralela o perpendicularmente a nuestra cara aunque no lo supo interpretar con claridad.

De otro lado, la *interferencia temporal* que conocemos como las *pulsaciones* (“*beats*” en inglés), se produce haciendo que dos diapasones de frecuencias ligeramente distintas oscilen al unísono o ligeramente desfasadas. El resultado es ahora un sonido, como sabemos, que se percibe mucho más grave y de frecuencia mitad de la diferencia de ambas.

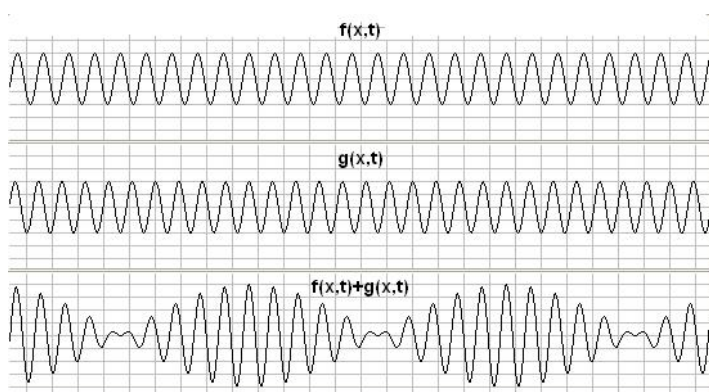


fig . 3.5.
Pulsaciones sonoras

Aunque su intuición le hacía decantarse por una interpretación en la que el principio de superposición diera cuenta de su explicación, otros contemporáneos preferían pensar que el tercer sonido era producto de una percepción más que un hecho real.

El año siguiente publica un artículo sobre la visión (Young, 1801), pero en breve retoma definitivamente el problema de la naturaleza ondulatoria de la luz y el sonido: la polémica estaba abierta en un contexto en el que se carecía de los aparatos para decidir entre las dos opciones .No son pues de extrañar los balbuceos e imprecisiones de Young en sus intentos de buscar un principio unificado que abarcara la explicación de todos ellos (Young, 1802a). Hubo que esperar hasta que Wilhelm Weber en 1826 solucionara definitivamente el problema del tercer sonido.

Su lucha fue intentar unificar los fenómenos de la luz y el sonido a partir de dos herramientas de las que fue creador: el principio de superposición de ondas y el de interferencia de movimientos ondulatorios.

El principio aplicado a la luz



fig . 3.6 Figuras de interferencia en el fondo de una cacerola

En sus primeros escritos hizo ensayos intentando resolver las interferencias con ondas triangulares de distinta frecuencia, con un evidente fracaso, por lo que poco después decidió admitir las ondas senoidales propuestas por Newton para el sonido, que sí permitían construcciones geométricas inteligibles. Es muy probable que en su aplicación fuera decisiva la aportación de Bernoulli de que una onda periódica se pudiera componer como combinación de varias armónicas de distinta frecuencia.

Ya comentamos que la ciencia ilustrada defendía la teoría de unos hipotéticos *fits* que acompañaban a los rayos de luz, que justificaba la periodicidad de los conocidos anillos de Newton y la de dos pares de polos asociados al corpúsculo de luz, la asimetría observada en la birrefringencia de la luz polarizada. No era demasiado creíble, pero funcionaba y podía aceptarse. Sin embargo para explicar que el radio de los anillos aumentase según se inclinaba el rayo, había que imaginar que el intervalo entre *fits* era variable según que la distancia que atravesaba el rayo en el medio, y además, que el número de estos *fits* fuera el mismo en los dos casos. Ello traía una nueva contradicción pues si el tiempo era el mismo, la velocidad debía crecer (Worral, 1976).

Más duro aún era admitir que los colores aparecidos en las sombras de la difracción se debieran a una refracción en el éter de densidad variable o fuerzas repulsivas cuya magnitud dependían de la proximidad del rayo al cuerpo, máxime cuando en sus observaciones fue incapaz de detectar las sombras internas.

El año de 1800 previo al de la lectura de su '*Bakerian Lectura*' (Young, 1802a) en la Royal Society, debió ser el *annus mirabilis* de Thomas Young. Sus nuevas experiencias y

justificaciones fueron sencillamente geniales. En ellas parte de un foco puntual (tácitamente impone como veremos la coherencia espacial) del que se obtienen porciones coherentes que se hacen interferir formando máximos y mínimos en la retina o en una pantalla.

Tras reconocer las aportaciones de Hooke, Huygens y Euler a la Teoría de los Medios, y sin perder el respeto a la figura de Newton, explicó que la aparición de los colores de las láminas delgadas se entiende mucho mejor si se acepta que la luz es una onda soportado por el éter. Recogiendo la idea de Euler de que la luz blanca es la suma de varias vibraciones monocromas, y aportando su personal descubrimiento de las interferencias luminosas, afirmó que la composición de los rayos reflejados en la primera y segunda superficie en aquellos casos en que su interferencia sea un número entero de longitudes de onda, produce los conocidos colores en las láminas de mica, pompas de jabón, alas de mariposas o en las plumas de los pájaros. Que se dio cuenta de que había encontrado algo importante lo muestra su comentario en la referida lectura:

... Cualquiera importancia que se dé a la opinión de la teoría de la luz y los colores que he tenido últimamente el honor de enviar a la Royal Society, hay que concederme que ha dado lugar al nacimiento de una ley simple y general, capaz de explicar un número de fenómenos de la luz coloreada, que sin esta ley, continuarían aislados e ininteligibles.

... La ley es que siempre que dos porciones de la misma luz llegan al ojo por distintos caminos, bien sea en la misma o en casi la misma dirección, la luz se hace más intensa cuando la diferencia de caminos es múltiplo de cierta longitud, y menos intensa en el estado intermedio de las porciones que interfieren; y esta luz es diferente para la luz de los distintos colores.

Un magnífico ejemplo de la aplicación de su principio fue el cálculo de las longitudes de onda del espectro visible a partir de las medidas de Newton del radio de sus anillos. Young postula que dos *fits* sumados (el de ida y el de vuelta) en el interior de la película de aire comprendida entre la lente plano-convexa y la superficie plana en la que se apoya, darían una longitud de onda. Es sorprendente el resultado de 576 nm para el amarillo que se obtiene de convertir las pulgadas al Sistema Internacional (Mollon, 2003).

Colour.	Length of an Undulation in parts of an Inch, in Air.	Number of Undulations in an Inch.	Number of Undulations in a Second.	Longitud de onda nm
Extreme -	.0000256	37640	468 millions of millions	
Red -	.0000256	39150	489	650
Intermediate	.0000246	40720	501	
Orange -	.0000240	41610	512	609
Intermediate	.0000235	42510	523	
Yellow -	.0000227	44000	547	576
Intermediate	.0000219	45600	561 (= 2" nearly)	
Green -	.0000211	47460	584	536
Intermediate	.0000203	49520	607	
Blue -	.0000196	51110	629	497
Intermediate	.0000189	52910	652	
Indigo -	.0000185	54070	668	469
Intermediate	.0000181	55240	680	
Violet -	.0000174	57490	707	444
Extreme -	.0000167	59750	735	

fig . 3.7 Medidas de los "fits" de Newton aplicadas por Young a sus longitudes de onda

Las láminas delgadas para Young

Young las estudió suponiendo un foco puntual monocromático, del que seleccionaba dos rayos coherentes que inciden convenientemente en una lámina de vidrio. Sólo la parte reflejada de uno de ellos en la cara superior del segundo y la que se refleja en la capa interna del vidrio, pueden interferir. Se demuestra que a cada punto del espacio sólo llegan con capacidad de interferir parejas como la indicada. Young razona como sigue:

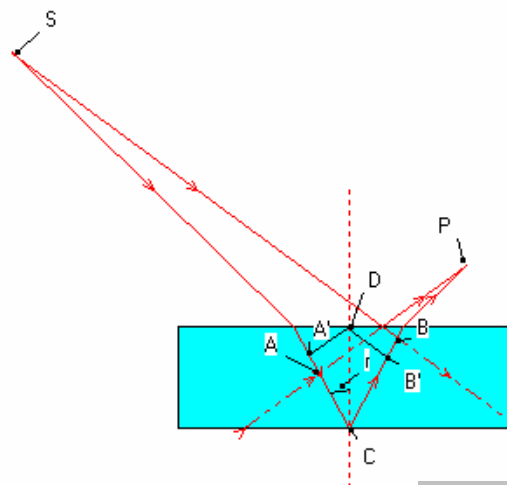


fig . 3.8

La diferencia de caminos recorridos por los dos rayos coherentes SACBP Y SDP, será

$$\Delta = (\text{SACBP}) - (\text{SDP}) = A'CB' = 2 A'C = 2nd \cos r$$

Luego si esta diferencia es un número entero de longitudes de onda habrá interferencia constructiva, y si es un número impar de semilongitudes será destructiva. Es claro que un observador sólo las ve si enfoca su mirada en el punto P, de ahí la dificultad para verlas.

Young ya percibió que cuando el espesor d fuera cero, también lo sería la diferencia de camino y si aplicaba la condición de $\Delta = 0 = n\lambda$ debería salir un máximo, lo que sería absurdo pues un espesor nulo no puede ejercer ninguna acción sobre la propagación de la luz y no habría reflexión. Para corregir este error impuso la condición de que debía haber un cambio de fase de π en la segunda superficie, cuando el cambio es de medio menos a más denso. O sea:

$$\Delta = 2nd \cos r + \lambda/2$$

Young da cuenta de la importancia de su hallazgo en una cita que se parece mucho a aquella en la Newton relata su descubrimiento a Oldenburg.

...Fue en mayo de 1801 cuando descubrí, reflexionando sobre los bonitos experimentos de Newton, una ley que me parece que explica una mayor cantidad de interesantes fenómenos que otras que cualquier otro principio óptico conocido.

En ‘*Chromatics*’ (Young, 1817), resume sus resultados:

a) La ley es que cuando dos porciones iguales de luz, en circunstancias exactamente similares, han sido separadas y coinciden de nuevo, en casi la misma dirección, cooperaran entre si o se destruirán, según que la diferencia de tiempos, ocupados en sus distintos caminos, sea un numero par o impar de la mitad de cierto intervalo, que es diferente para los distintos colores, pero constante para la misma clase de luz.

b) En la aplicación de la ley a medios distintos, la velocidad debe suponerse inversa al índice de refracción.

c) En las reflexiones en la superficie de un medio menos denso, algunos metales, en todas las direcciones muy oblicuas, en las difracciones y en algunas refracciones extraordinarias, la mitad de un intervalo parece perderse.

d) Dos porciones de luz, polarizadas en direcciones transversales, no interfieren entre sí.

Un resumen de su trabajo (Nahum Kipnis, 1991), insiste en que el tratamiento de Young es correcto pero restrictivo, pues no considera la posibilidad de que rayos paralelos coherentes puedan interferir cuando en realidad sabemos que el cristalino hace el papel de lente convergente que

enfoca en la retina estos rayos. Sabemos que su dominio de la las ópticas geométricas y fisiológica eran notables, ¿por qué ignoró el tratamiento más general?

Evidentemente, el desafío era grande, pero sus matemáticas funcionaban, por lo que a excepción de la desautorización del censor de revistas científicas Brougham, no encontró grandes oposiciones ni apoyos. En 1802 encontró un apoyo complementario a su teoría cuando su amigo Willlian Hyde Wollaston (1766-1828) le comenta sus experiencias con la doble refracción en las que no encuentra explicación al índice de refracción extraordinario y Young se las aclara desde su teoría (Young, 1807).

El arco iris supernumerario

Hemos visto que la teoría de Newton predecía perfectamente los colores y los ángulos de los arcos principal y secundario, pero su modelo no aportaba ninguna luz a la aparición de unas bandas verdosas y violáceas que aparecen a veces bajo el arco principal. Sin embargo, Young dió en 1804 una explicación convincente para este fenómeno que supuso un refuerzo definitivo a su teoría (Kipnis, 1991). Ya vimos que para una distancia óptima del rayo al centro de la gota, rayos muy próximos paralelos, salen también paralelos. Si consideramos estos rayos como porciones coherentes de un mismo frente de onda que recorren caminos ópticos diferentes, relacionados con el tamaño de la gota dentro de la misma a través de sus sucesivas reflexiones y refracciones, se induce un desfase entre ambos que se traduce en interferencias destructivas y constructivas.

:

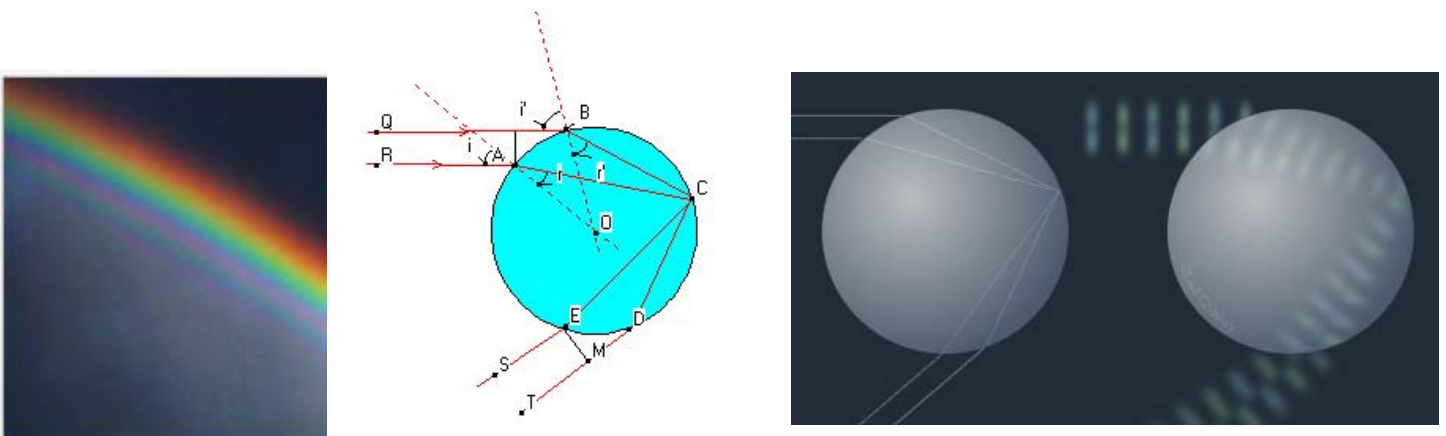


fig . 3.9 Modelo interferencial de Young para el arco iris supernumerario

La diferencia de caminos entre los rayos indicados, será:

$$P = n (AC+CE-BC-CD) -DM-BN \Rightarrow$$

$$P= 2 (AC-BC)n - 2 BN \Rightarrow$$

$$P= 2R [n (s r - \cos r') - (\cos i - \cos i')]$$

Donde R es el radio de la gota de agua, i, i' , r, r' los ángulos de incidencia y refracción respectivamente de ambos rayos. Como vemos, el radio de la gota es un factor más para el desfase (Verdet ,1869). Young utilizó esta expresión para medir de modo indirecto el tamaño de las gotas de agua a partir de los demás datos conocidos. La explicación era incompleta pero abrió el camino al tratamiento exhaustivo que Amie y Ayrís hicieron del mismo en el que consideraban la difracción de los haces.

La difracción de la luz a través de un cabello

Aunque en 1801, su modelo de difracción copia la idea de que los rayos próximos a un cuerpo se refractan en un éter de densidad variable, en 1802 cambia de opinión y supone que los rayos de luz tienen una tendencia natural a doblarse cerca de las sombras, similar a la del sonido que bordea los obstáculos. De acuerdo con ello cuando dos rayos procedentes de un mismo cuerpo llegan al mismo punto de una pantalla en direcciones casi iguales, uno en línea recta, y otro tras desviarse, su interferencia dará máximos o mínimos.

Young relata que sus primeras experiencias las realizó colocando un cabello en medio de un hueco rectangular. Mirando a su través hacia una vela, pudo observar las franjas de difracción de los rayos que llegaban de ambos límites del cabello.

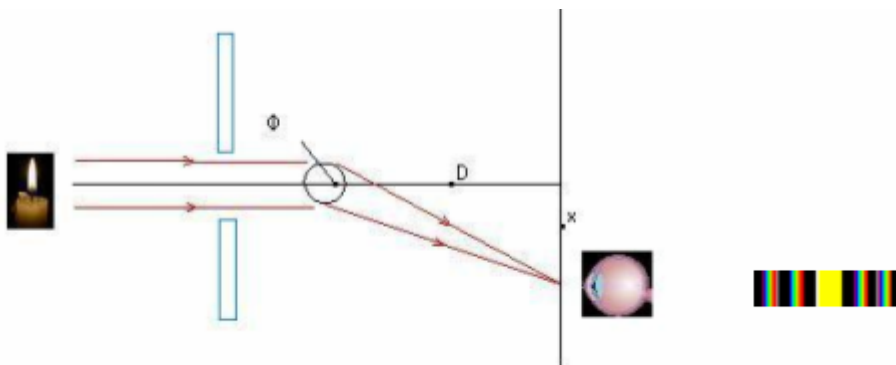


fig . 3.10 figura de la luz difracción en un cabello

..Por tanto hice un hueco rectangular en un cartón, y doblé sus extremos para soportar un cabello paralelamente a los lados del hueco; después, una vez aplicado el ojo cerca del agujero, el cabello (por supuesto) aparecía dilatado por la visión indistinta en una superficie, de la cual el ancho estaba determinado por la distancia del cabello y la que si la diferencia de magnitud del agujero, independientemente de la apertura temporal de la pupila. Cuando el cabello se aproximaba tan cerca del margen de una vela para que la luz inflectada fuera bastante copiosa como para producir un efecto sensible, las franjas empezaron a aparecer; y fue fácil estimar la proporción de su anchura respecto de la anchura aparente del cabello a través de la imagen... Encontré que seis de las más brillantes franjas rojas, casi a la misma distancia, ocupaban el total de la imagen. El ancho de la apertura fue 66/1000 de una pulgada, y su distancia al cabello fue de 8/10 de una pulgada; el diámetro del cabello fue 1/600 de una pulgada. Por tanto tenemos 11/1000 para la desviación de la primera franja roja a la distancia de 8/10 y como $(8/10)/(11/1000) = (1/600)/(11/480000)$. Por tanto 1/43636 de pulgada para la diferencia de caminos de la luz roja donde es más intensa (Young, 1802b).

El relato expresa que si la diferencia de caminos de los rayos que llegan a una pantalla situada a una distancia D , tras doblarse en los extremos de un cabello de radio Φ , sobre un punto distanciado x de su centro, producirá un máximo si tiene, como mínimo, el valor de una longitud de onda.

$$\Phi \sin\theta = n \lambda$$

Sustituyendo el valor $n = 1$, $\sin \theta = (6/10)/(11/1000)$, $\Phi = 1/600$ inch, obtuvo un valor muy aceptable de la longitud de onda para el color rojo (la que se da en la actualidad es 630 nm)

$$1/43636 \text{ inch} \cdot 0,0254(\text{m/inch}) \cdot 10^9 \text{ nm/m} = 5821 \text{ nm}$$

Vemos que corresponde a la conocida expresión de las interferencias en doble rendija. De hecho, si se suprimen los dos bordes de ésta, queda un solo obstáculo central, por lo que a los efectos las dos experiencias son la misma.

A pesar de lo rebuscado de la expresión, repetí personalmente la experiencia utilizando la luz de una vela como foco intercalando entre mis ojos dos monturas de diapositiva. En la primera instalé una rendija variable con dos pequeños papeles que al unirse formaban una rendija de espesor variable que hacía las veces de foco casi puntual, y en la otra pegué un cabello en un agujero rectangular practicado en un cartón paralelamente a la vela. Forzando una anchura de 1mm para la rendija, una distancia entre el cabello y la primera montura de unos 5cm y la mirada a unos 3 cm del cabello, se observan perfectamente unas seis o siete franjas brillantes coloreadas a ambos lados de la franja brillante central. Si en lugar de una vela colocaba un laser de diodo rojo, las franjas, ahora rojas y oscuras aparecían en las mismas condiciones sobre una pantalla. Young ya percibió posteriormente, que esta experiencia es idéntica a la obtenida con una doble rendija a la que se suprimen los bordes exteriores.

Sin embargo, su experiencia más conocida es la del “*Screening Experiment*” cuando, al observar en 1803 las franjas internas del pequeño cuerpo AB en la pantalla M, puso otro pequeño obstáculo PQ detrás de uno de límites y vio con sorpresa que las sombras de difracción desaparecieron.

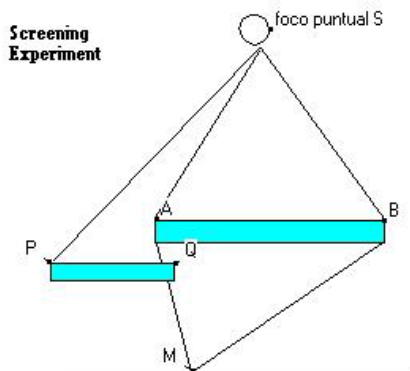


fig . 3.11

En sus propias palabras, comenta:

... estas franjas eran el efecto conjunto de la luz que pasaba por cada extremo del trozo de la plaquita AB , y , desviada, o más bien, difractada , hacia el interior de las sombras.(Young, 1804)

Ello parecía reforzar definitivamente la tesis de la interferencia puesto que al desaparecer el rayo AM desaparecía el mínimo, pero tampoco explicaba algunos cabos sueltos como el hecho de que al sustituir el delgado cabello de un hombre por el más grueso de un caballo, las franjas desaparecían, y que en el nuevo razonamiento no se explicaba el comportamiento del posible rayo PM, por lo que Young no volvió a apoyarse en esta espectacular experiencia.

Como se ve, Young interpretaba la difracción componiendo parejas de rayos que interfieren. Sus explicaciones ante cada caso concreto son oportunistas y carecen de la belleza unificadora de las de Fresnel.

La doble rendija

La que ha sido seleccionada recientemente como la experiencia más hermosa de la Física, fue diseñada por Young haciendo incidir un haz de luz sobre un pequeño diafragma circular y colocando a continuación dos pequeños agujeros practicados en una segunda cartulina. Más tarde sustituyó los agujeros por rendijas con lo que consiguió mejorar sensiblemente la intensidad de la señal luminosa.

Young relata su experiencia sin indicar desarrollos matemáticos, ni la fuente que utiliza, por lo que algunos historiadores lo refieren como “un experimento mental” similar a los de Galileo (Worral, 1976). Es un tema polémico al que el autor Nahum Kipnis aporta de nuevo luz. Dado lo difícil de

conseguir rendijas suficientemente próximas, lo más probable es que, aunque realizara la experiencia, puesto que la distancia entre rendijas necesaria para observar las interferencias es del orden de 0,05 mm, viera sólo la figura de difracción y la confundiera con la de interferencia. Su relato sigue teniendo vigencia:

... Un haz de luz homogénea incide sobre una pantalla en la que hay dos agujeros o rendijas muy pequeños, que pueden ser considerados como centro de divergencia, desde los cuales la luz es difractada en cualquier dirección. En este caso, cuando los recién creados rayos son recibidos por una superficie que los intercepta, su luz es dividida por franjas oscuras en porciones casi iguales, que se hacen más anchas según la superficie se aleja de la apertura, y también más anchas según las aperturas se acercan entre sí. La mitad de las dos porciones es siempre luz, y las franjas brillantes a cada lado están a tales distancias que la luz, llegando a ellas por una de las aperturas, debe haber pasado a través de un espacio más largo del que llega desde el otro en un intervalo que es igual a la anchura de una, dos o tres de las supuestas ondulaciones, mientras que los espacios oscuros corresponden a la diferencia de una mitad de la supuesta ondulación, una y media, dos y media o más. (Young, 1802a)

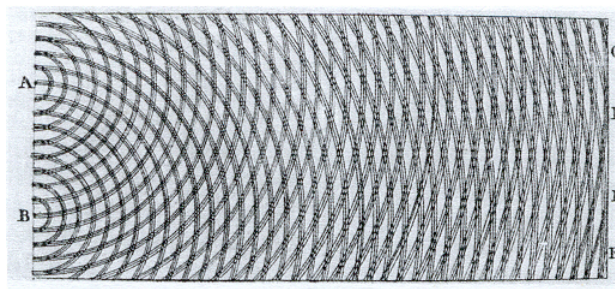


fig . 3.12

Aunque un estudio correcto debe incluir los efectos de difracción, los soslayaremos de momento por simplicidad didáctica. En las circunstancias ideales (suponiendo las rendijas lo suficientemente estrechas para ignorar los efectos de difracción) la doble rendija funciona como sigue (Seerway, 1995) :

Una rendija S intercepta el camino de la luz de una vela, con lo se consigue una fuente puntual la que salen ondas coherentes de igual fase que llegan a dos rendijas S_1 y S_2 reemiten dos onditas secundarias que interfieren en una pantalla lejana dando lugar una imagen parecida a la indicada.

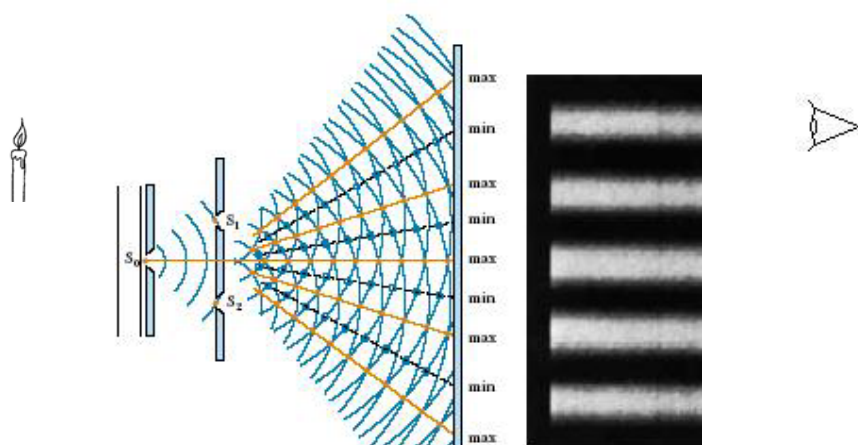


fig . 3.13

Su interpretación es sencilla si se suponen ondas senoidales que salen de los focos S_1 y S_2 e interfieren en puntos R y Q en direcciones casi paralelas (se supone la pantalla a una gran distancia) .

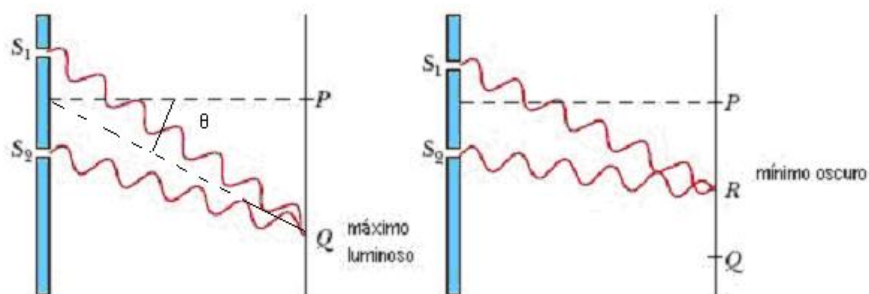


fig . 3.14

En los lugares de la pantalla Q y R a los que llegan parejas de ondas senoidales distanciadas un número entero de longitudes de onda, ambos efectos se refuerzan en una zona brillante, y si la distancia es un número impar de semilongitudes de onda, se anulan en una zona oscura. Las bandas paralelas en la zona central que se van atenuando según nos alejamos .Si la pantalla es estrecha se observan bandas, pero si es suficientemente ancha, éstas se curvan y se perciben las conocidas hipérbolas.

$$\text{En los máximos: } s_2 - s_1 = m \lambda = d \sin \theta \quad (m = 1, 2, \dots)$$

$$\text{En los mínimos} \quad s_2 - s_1 = (2m + 1) \lambda / 2 = d \sin \theta \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

Aunque Young no se cuestionaba el aspecto energético, el resultado es paradójico: se puede argumentar que luz más luz da oscuridad del mismo modo que dos cuerdas que actúan simultáneamente sobre una anilla, desfasadas media longitud de onda, no producen oscilaciones, ¿pero qué ocurre con la energía de las ondas luminosas? Un sencillo cálculo que aparece en todos los textos universitarios muestra que si se computa la intensidad media que llega a la pantalla, es la misma tanto si hay interferencias como si no. Lo único que consigue la doble rendija es redistribuir las intensidades.

Dado que para obtener la proyección en una pantalla necesitaba la luz solar, Young también hizo la observación directa, intercalando una rendija entre la vela que utilizaba como foco. He reconstruido la observación visual directa de los máximos y mínimos de una vela con el sencillo material de un laboratorio escolar (una rendija sencilla que sólo es necesaria si el foco no es puntual o está próximo, y una doble rendija) y los resultados son espectaculares.

Young identifica la condición de coherencia

La dificultad de observar las interferencias luminosas a menos que se interponga la rendija inicial o el foco esté lo suficientemente lejos como para que el foco pueda considerarse puntual, hizo que fueran difíciles de reproducir y observar.

Hoy sabemos que para que exista interferencia, la diferencia de fase entre dos rayos monocromáticos debe mantenerse constante, pero dado que los focos naturales de luz emiten sucesivos trenes de onda casi monocromáticos de una longitud media de unos 3 cm (experiencias de Fizeau), y que si provienen de puntos alejados, no existe ninguna concordancia en las respectivas fases, ello explica las dificultades en la obtención (e interpretación) de las interferencias luminosas. Dicho en otras palabras, los frentes de luz deben ser *coherentes* para interferir, y ello sólo se podía conseguir separando el rayo inicial en dos partes que mantenían constante la diferencia de fase y después convergían de nuevo en una pantalla o en la retina del ojo produciendo interferencias constructivas o destructivas.

A modo de resumen recordaremos que la coherencia implica:

- que las radiaciones sean de igual frecuencia
- que tengan el mismo origen
- que la diferencia de caminos sea pequeña

- que la fuente de luz sea puntual

Asombra que Young ya detectara implícitamente éste problema como lo demuestra la elección de focos puntuales, la elección de dos rendijas para su célebre experiencia, el uso de rayos de igual frecuencia, la condición de la dirección casi idéntica, al forzar una gran distancia a la pantalla, y algunas citas inequívocas.

...No hay razón para suponer que las ondulaciones de la luz sean continuas. Su intermisión puede ser fácilmente un millón de veces mayor que la duración del paquete de ondulaciones.

Es sin embargo Fresnel el que, como veremos, da la explicación definitiva.

El impacto del Principio de Interferencia

Young irrumpe en 1801 con su teoría ondulatoria, pero percatado de que aún le falta mucho para ser una teoría general, prefiere limitarse a la solidez de su principio de interferencia entre pocos rayos.

A pesar de que vulgarmente se achaca a la sombra de Newton la escasa acogida inicial de sus tesis, el caso es más complejo. A excepción de su bestia negra, el censor de revistas científicas, Henry Brougham, lo cierto es que no existió especial rechazo a sus ideas pero varios factores contribuyeron a su escaso impacto: es cierto que la influencia de Newton era abrumadora, pero además, los intereses de los científicos de la época estaban en otros temas como el calor, la mecánica racional, o la electricidad. La óptica estaba aparcada en las tesis ilustradas hasta que apareció la intervención de nuestro protagonista, pero también es cierto que su obra estaba mal presentada, que el relato de sus experiencias era pobre, y que aunque era un excelente matemático, fue demasiado parco en sus desarrollos. De haber podido ofrecer un cuerpo ondulatorio coherente como hizo Fresnel, es probable que hubiera atraído más atención.

Pero también ocurría que la comunidad de su tiempo no estaba preparada para entender la teoría de unas experiencias de difícil observación por lo que muchas de sus críticas nacían, como le pasó a Newton, de la ignorancia de sus contemporáneos.

Tras una favorable acogida de su amigo Wollstone en 1801 a cuyos trabajos de medida del índice de refracción del rayo extraordinario, con el Espato de Islandia, las tesis de Young le aportaron nuevas clave, y una tibia acogida del químico Davis, autor de una teoría ondulatoria del calor, en enero de 1803, el censor de la revista *Edinburgh Review*, Henry Brougham, comenta sus

artículos ‘*Theory of Light*’ y ‘*Production of Colours*’ de un modo especialmente cruel, diciendo que su teoría

...no merece el nombre ni de experimento ni de descubrimiento, porque sólo maneja hipótesis.

Algunas de sus críticas eran mordaces:

...Sus débiles elucubraciones, en las que hemos buscado sin éxito, agudeza e ingenio.

...El nuevo caso de los colores ha sido observado miles de veces...; y Young tiene el único mérito de haber dado una explicación absurda y contradictoria.

...¿En qué principio conocido de óptica se puede concebir, que la verdadera causa del color blanco la blancura, una mezcla de rayos, pudiera crear color, y que dos haces, de qué manera o por qué nueva ley, pudiera, mediante esta unión, ser separado en varias franjas coloreadas, con intervalos coloreados y un centro blanco?

Realmente sus críticas no van contra la interferencia sino contra la aparición de los colores.

...Es una de las suposiciones más incomprensibles que yo recuerde en la historia de las hipótesis humanas.

Young le contesta en 24 de noviembre del mismo año en ‘*Experiments and Calculations*’ y presenta una nueva táctica: exponer sólo los fenómenos y eludir las hipótesis (de nuevo el ejemplo de Newton).

...De los experimentos y cálculos que he expuesto, se me puede permitir la inferencia de que la luz no es homogénea, pues a ciertas distancias iguales en la dirección de su movimiento, posee cualidades opuestas, capaces de neutralizar o destruir a la otra, y de extinguir la luz en los lugares en que está unida; que esas cualidades se suceden una a la otra alternativamente en superficies concéntricas. A distancias que son constantes para la misma luz, pasando a través del mismo medio.

Broughan contesta en el ‘*Philosophical Magazine*’, que sus cualidades opuestas eran absurdos metafísicos y ante lo que se iniciaba como una polémica estéril, Young decide abandonar la discusión y escribir en otros foros.

Otros críticos no fueron tan crueles, pero argumentaban desde sus propias concepciones erróneas de la luz y a menudo con escaso rigor. Es el caso de Brewster que alegaba la incapacidad de Young para explicar las hipérbolas observadas por Newton o el hecho de que dos haces de la luz blanca de la doble rendija pudieran producir color.

Entre 1807 y 1811 no aparecen artículos al respecto, pero en 1812 el descubrimiento de los polarizadores de Malus anima la escena científica. Arago que estudiaba la reflexión y refracción de

la luz polarizada por cristales delgados, constata que ambas superficies son responsables de la producción de colores y acude a las explicaciones de '*Theory of Light*'. Incluso Brewster rectifica sus críticas a la vista del nuevo impacto en la polarización cromática.

Hay que esperar a 1815 a que la teoría fuera suficientemente conocida en Inglaterra, pero sin los apoyos Arago, Malus, Biot y Brewster que transformaron la óptica física en una ciencia cuantitativa, su principio no habría tenido atención.

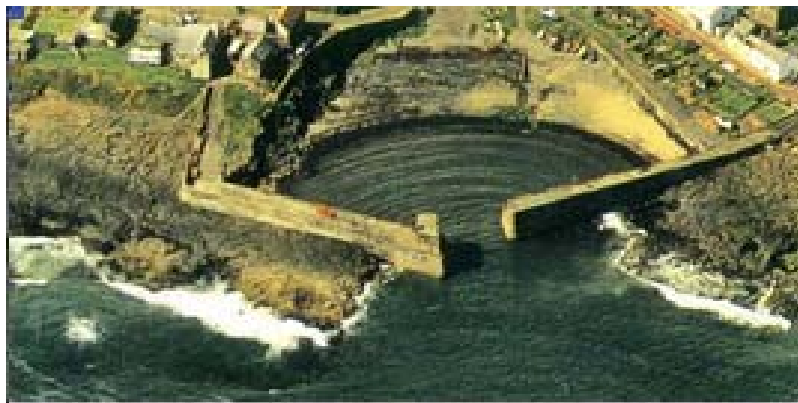
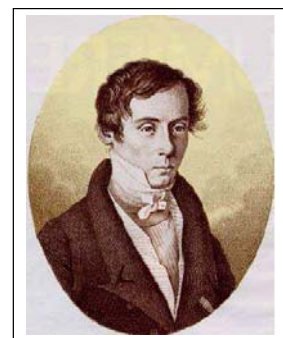


fig . 3.15 Difracción de olas a la entrada de un puerto

5.3.3 La Difracción de Augustin Fresnel

El inventor de las lentes de los faros actuales, poco pensaría que esta actividad le daría más reconocimiento que su tratamiento de la Óptica, que puso patas arriba todo el cuerpo de esta disciplina. Fue quizás el primer científico de la Historia que decidió especializarse en un solo tema de la ciencia, y desde luego le fue rentable.



Hijo de un arquitecto jansenista que restauraba castillos de la nobleza, entre ellos uno de los antepasados de De Brooglie, la trayectoria de Fresnel no parecía ir más allá de un buen aficionado a la ciencia. Nace en 1788 y estudia brillantemente una ingeniería civil. Trabajando como ingeniero en 1814 en las carreteras del sur de Francia que unía España con Italia, comienza ya entonces a especular con la aberración estelar y su paralaje. En marzo del 1815 se alista contra Napoleón cuando éste vuelve de la isla de Elba para retomar el poder. Tras la victoria napoleónica, Augustin debe volver a su casa familiar

de Matihieu (Normandía), donde se le impone un leve arresto. Una vez allí, sin posibilidad de ejercer profesionalmente, la protección familiar le permite retomar seriamente las investigaciones ópticas que hasta entonces sólo habían sido una hermosa afición, ayudado por un herrero de la localidad que le construía los aparatos.

Su despegue hacia la Ciencia se inicia cuando tras pasar breves días en verano de 1815 en París con su antiguo compañero de la escuela de ingenieros, François Arago, éste le introduce en los trabajos de difracción de Grimaldi, Broughan y Young de los que saca poco provecho por su desconocimiento del inglés. De vuelta a su localidad, en septiembre del mismo año, comunica a Arago que ha descubierto la ley de la difracción y le pide asesoramiento sobre la actualidad científica pertinente.

...Pienso que he encontrado la explicación y la ley de las franjas coloreadas que uno percibe en la sombra de los cuerpos iluminados por un punto luminoso. Los resultados de mis cálculos son confirmados por la observación. Sin embargo, no puedo llevar estas observaciones al grado de exactitud necesario para estar totalmente cierto de lo correcto de mi ecuación. Por ello, necesito los instrumentos que sólo puedo conseguir en París. Antes de hacer este gasto, quisiera saber si tiene utilidad, y si la ley de difracción, no ha sido ya establecida por experimentos suficientes.

tres semanas más tarde relata en un escrito a la Academia la difracción en franjas estrechas. Sorprende cómo repite los pasos de Young para aislar variables y asegurarse de que ambos rayos contribuyen a las sombras observadas, pues al eliminar el efecto de uno de los bordes, éstas desaparecían:

...He pegado varias veces un pequeño papel negro cuadrado en una cara de un alambre de hierro que me servía en mis experimentos, y he visto inmediatamente cómo las franjas desaparecían contra este papel ; sin embargo, yo sólo buscaba su influencia en las franjas externas y de algún modo me negaba a aceptar la notable consecuencia a la que llevó este fenómeno. Me impactó cuando me ocupaba de las franjas internas , imaginé esta consideración: ya que si se intercepta la luz de un lado del alambre uno puede hacer que desaparezcan las franjas internas, entonces el encuentro de los dos rayos que llegan de las dos caras , es necesario para su producción

Es más que probable que sin la ayuda de Arago, su genio se hubiera malogrado: Fresnel tenía el impulso creador y el talento, y su amigo Arago, además de un gran nivel científico, las relaciones sociales suficientes y la máxima actualización de la óptica de su época que le conseguía su puesto de miembro de la Academia de las Ciencias. En el breve resumen que haremos de sus ideas, destaca su aportación a la difracción de la luz mediante sus ondas secundarias, y la más importante aún, de que las ondas de luz son transversales a la dirección del rayo. Aunque su salud era débil (muere a los treinta y nueve años de tuberculosis) su entrega a los trabajos fue absorbente.

Su trayectoria científica es vertiginosa: fue un experimentador sobresaliente, creador de hipótesis revolucionarias, poseedor de un talento matemático con el que da el cuerpo teórico en sólo seis años al nuevo paradigma comparable para muchos al de la Gravitación Universal. A diferencia de Young, el hecho de que en la Francia de su tiempo hubiera un excepcional nivel matemático y de lo estructurado de su obra, supuso para él un reconocimiento unánime. Ganador del premio que convocaba la Academia con el tema de la Difracción de la Luz, es elegido miembro de la Academia y de la Comisión para la Iluminación de Puertos. Pocas vidas de científicos son tan intensas:

EFEMÉRIDES DE FRESNEL

1809 Malus identifica las luces polarizadas reflejada y refractada.

1811 Jean François Arago (1786-1853) descubre la polarización cromática.

1814 Ocupación de París. Inicia estudio del paralaje estelar y aberración de Bradley. Brewster descubre su ángulo. Fresnel le pide a su hermano un libro de difracción. Young comenta por cromática en Quaterly Review, busca relación con interferencias.

1815 Redescubre el principio de interferencia. Presenta a L'Académie des Sciences su primera memoria de difracción.

1816 En octubre refiere la interferencia de luz polarizada con espejos y dice que la diferencia de caminos no debe ser mayor de seis o siete longitudes de onda. Arago y Fresnel descubren que dos ondas polarizadas perpendicularmente no interfieren lo que les lleva a admitir la naturaleza transversal de las ondas de luz.

1817 Con Arago descubre la polarización circular. Generaliza su principio a varias ondas. Young propone en Chromatics la transversalidad para explicar la no interf de luz polarizada.(sólo un débil movimiento transversal que acompaña al longitudinal).

1818 Presenta a L'Adémie des Sciences la '*Mémoire sur la diffraction de la lumière*'. El 29 de julio donde Introduce el Principio de Huygens- Fresnel

1819 Publicación de su Memoria premiada sobre difracción. Explica la no interferencia de las luces de distinta frecuencia. Comparando con las del sonido, se da cuenta que la frecuencia de los *beats* luminosos es demasiado alta para ser percibida. Le preocupa la conservación de la energía y en las láminas paralelas refiere que los máximos de la refracción coinciden con los mínimos de la reflexión. En 1819 lo relata sobre los dobles espejos, pues la energía media concentrada en dos máximos y mínimos es constante, y es la misma que si las dos ondas no interfieren, en una carta a Young. Con Arago publica las condiciones de interferencia de la luz polarizada. Es nombrado miembro de la Comisión de faros y balizas.

1821 El de su teoría de las ondas transversales y la polarización cromática. '*Considérations mécaniques sur la polarization de la lumière*' y después '*Mémoire sur la double réfraction*' (Verdet p 457).

1822 Descubre todas las condiciones de coherencia. Publica '*De la Lumière*' y '*Memorias sobre doble refracción*'. Presenta los conceptos físicos con más claridad y detalle. Memoria sobre doble refracción. Comienza sus trabajos para el diseño de lentes y focos para faros más intensos.

El fin de los *fits*

Fresnel es el genio que superó a Young. Donde éste tenía intuiciones, el francés establece un principio general del que se deducen casi todas las interrogantes de la óptica de su tiempo. No sólo creó la matemática de las placas zonales que predecía resultados de experimentos con desusada precisión, sino que también propuso su modelo de la óptica ondulatoria desde la profunda hipótesis de unos osciladores atómicos que reemitían ondas coherentes de corta longitud e interferían en condiciones favorables. Además es el primero en percibir que las ondas de luz deben ser transversales, la longitud finita de los trenes de onda, en exponer la definición precisa de la coherencia espacial y temporal, y en definitiva, el que establece de modo definitivo que la difracción de la luz predice tanto el comportamiento clásico de la óptica de rayos como aquellos casos que ésta no podía explicar, como lo son las extrañas sombras que producen los focos puntuales o las insalvables deficiencias de los instrumentos ópticos .

Al igual que a Young, la teoría de los *fits* del maestro Newton no le satisface en absoluto y, es más, la desmonta con un rigor implacable:

...Era natural suponer que estos intervalos, como la velocidad de la luz, eran siempre los mismos en los mismos medios, y que, por consecuencia, en incidencias más oblicuas, el diámetro de los anillos debía disminuir, dado que el camino recorrido había aumentado. La experiencia nos muestra, por el contrario, que el diámetro de los anillos aumenta con la oblicuidad de la incidencia, y Newton se vio entonces obligado a concluir que los accesos aumentaban con la longitud, y en una relación bastante mayor que la de los caminos recorridos. Tenía entonces que suponer los accesos más largos en los medios que la luz atraviesa con más velocidad, que, según él, son los cuerpos más densos; porque era natural suponer que sus duraciones permanecerían isócronas en los diferentes medios. La experiencia le probó lo contrario: reconoció que el espesor de las láminas de aire y de agua, por ejemplo, que reflejan el mismo tono bajo la incidencia perpendicular, está exactamente en la relación del ángulo de incidencia al de refracción, para el paso de la luz del aire al agua: lo que es precisamente una de las consecuencias más asombrosas de la teoría de las ondulaciones. Le hizo falta por tanto, suponer que la longitud de los accesos estaba en relación inversa de la velocidad de la luz, o lo que es lo mismo, que el tiempo de su duración disminuía siguiendo la misma relación que el cuadrado de su velocidad que aumentaba.

Pero no sólo destaca esas contradicciones, sino que demuestra que la interpretación de Newton de que la aparición de los anillos hay que buscarla sólo en la reflexión de los rayos que tras llegar a la capa de aire llegan a la lente plano-convexa y placa horizontal, es absurda.

Por su interés histórico, hemos repetido sus observaciones y razonamientos con un prisma y luz monocromática apoyándonos con un software de simulación de trayectorias de rayos. Hay textos clásicos que desarrollan las fórmulas, pero es más importante la visión de conjunto que proporcionan unos gráficos secuenciados.

Las láminas delgadas

En lo que sigue supondremos una fuente extensa. Si la lámina ya no es plana y la incidencia se aleja de la normal, los rayos que interfieren parecen venir de su imagen virtual, el punto P. Si jugamos con el grosor de la lámina, se ve que al disminuir el espesor de la capa de aire que los separa, el punto P viaja en el interior de la lámina siguiendo una línea dirigida hacia la arista del plano, y además los dos rayos reflejados se cierran más lo que permite ver la interferencia con la pequeña pupila de entrada de un observador (3-5 mm)

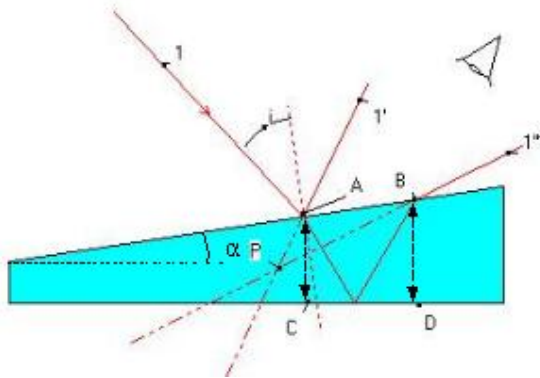


fig . 3.16

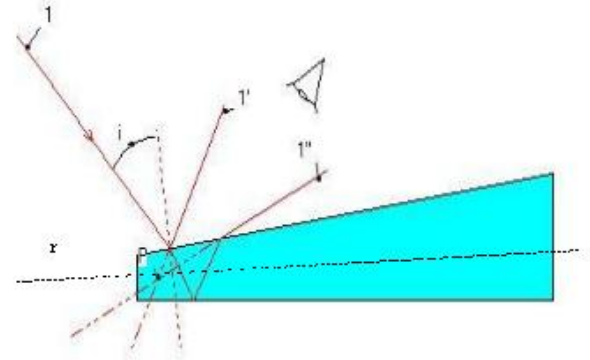


fig . 3.17

Si la interfase de aire es muy delgada, los haces que inciden según un ángulo alejado de la normal dan origen a una pareja bastante abierta, que una pupila estrecha no puede enfocar simultáneamente en la retina y por tanto no producirá interferencias. Otra cosa sucede cuando el rayo incide muy próximo a la normal pues los rayos emergen muy cerrados y al recogerlos ahora la pupila, el cristalino los puede enfocar sin dificultad en un punto P próximo a las placas. Jugando ahora con el ángulo de incidencia, se comprueba que los dos haces que interfieren salen con un ángulo más abierto cuando éste crece a su vez.

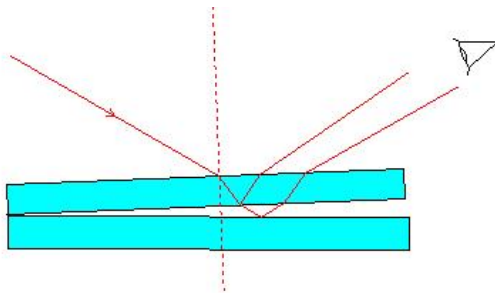


fig . 3.18

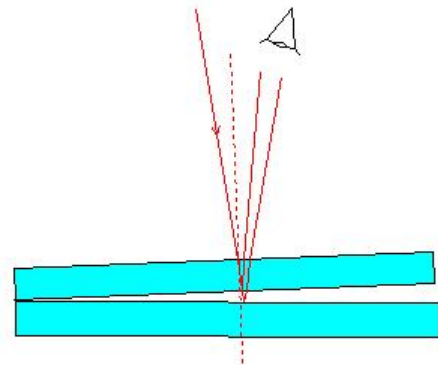


fig . 3.19

El problema que se origina cuando se ilumina con una luz blanca extensa, no es fácil de resolver debido al solapamiento variable de las interferencias de los distintos tonos. Nótese que en la realidad se observan franjas coloreadas en las que faltan algunas franjas.

Por este motivo es mucho mejor hacer las experiencias con luz monocromática (fig.3.2) como son la amarilla (no coherente) de una lámpara de sodio , o mejor aún, la coherente de una fuente Laser. Si unimos dos portobjetos de vidrio entre los que se introduce una hojita de papel y se unen en un extremo por una pequeña goma, son posibles observaciones de máximos y mínimos tanto en las caras sobre las que se refleja la luz, como en aquellas observadas tras la transmisión a través de ellas. Las imágenes que obtuvimos lo evidencian con claridad

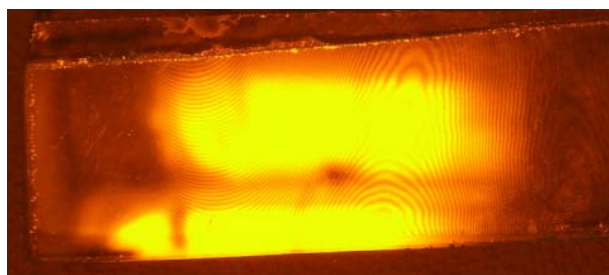


fig . 3.20..Interferencias de luz reflejada en lámina de aire entre dos portaobjetos.

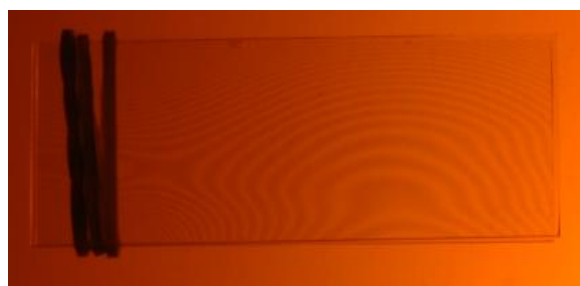


fig .3.21. Interferencias con luz transmitida en lámina de aire entre dos portaobjetosj

Interferencias con prismas

Newton obtuvo sus anillos y bandas (para él consecuencia de los fits de los corpúsculos luminosos) mediante dos prismas puestos en contacto por sus bases o con una lente plano-convexa de gran distancia focal (para minimizar el espesor de la capa de aire) en contacto con un vidrio plano.



fig . 3.22 Versión de la experiencia de Fresnel en nuestro centro

Lo que él no podía sospechar era que Fresnel utilizara estas experiencias superponiendo un prisma sobre una lente plano-convexa o sobre un vidrio plano para asentar la teoría ondulatoria.

Tomó éste último caso y ennegreció la base y la cara inferior de la placa, con lo que se consiguió eliminar sus correspondientes reflejos: si en la formación de los anillos no interviene la luz reflejada en el prisma, tampoco se vería ésta luz en ausencia de anillos. Su desaparición o debilitamiento sólo puede deberse, pues, a la interacción con los rayos reflejados por la superficie plana en contra de lo expuesto por Newton. Según sus palabras:

...Para convencerse, basta con colocar un prisma sobre un vidrio cuya superficie inferior ha sido ennegrecida, de forma que el ojo no reciba más luz sensible que la que es reflejada por las dos superficies de la lámina de aire entre los dos vidrios. Si se les dispone de forma que el prisma sobrepase al vidrio, y que el punto de contacto se encuentre hacia la extremidad de éste, se podrá entonces comparar los anillos oscuros en la parte de la base del prisma que excede a la superficie, que no envía al ojo más que el producto de una sola reflexión: ahora bien, se verá, sirviéndose de luz homogénea, que esta parte del prisma está mucho más iluminada que los anillos oscuros, que no pueden por ello volver a ser considerados como resultante sólo de la supresión de la luz inferior, sino de una disminución considerable de la reflexión superior, particularmente en los puntos más sombríos del primero y segundo anillos, donde toda reflexión parece apagada, cuando los vidrios están bien pulidos y la luz incidente lo suficientemente simplificada. Es evidente que si eso no ocurre para los otros anillos, que se deba a un defecto de la luz homogénea. Pero si no se llega a producir un negro completo, se puede, fácilmente, incluso hasta el sexto orden, hacerles lo suficientemente oscuros como para poner en evidencia el debilitamiento de la reflexión superior. Este fenómeno me parece difícil de explicar por la teoría de Newton... (Fresnel, 1819)

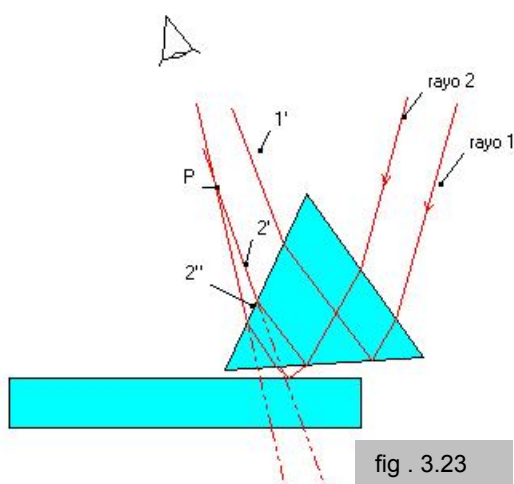


fig . 3.23

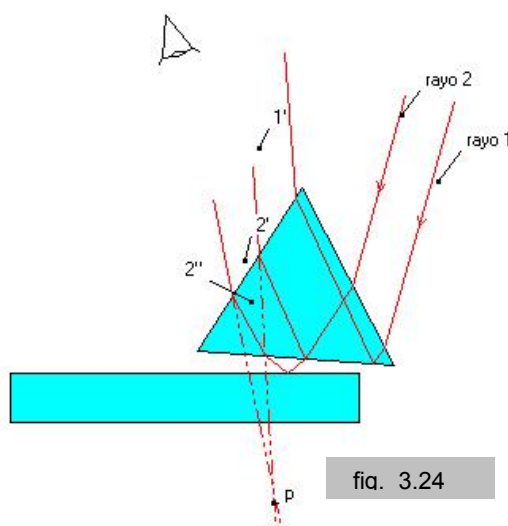


fig. 3.24

Personalmente considero la explicación bastante confusa pero el recurso al uso del prisma para dirimir entre ambas teorías tiene la consistencia de otro Experimentum Crucis. He repetido la experiencia y dependiendo del apoyo entre ambas superficies, a menudo irregular, se tendrá uno de los dos casos indicados. En el primero se obtienen interferencias en puntos reales P situados

por encima del prisma , y en el segundo aparecen interferencias debidas a supuestos focos puntuales situados debajo del prisma. Su visualización es muy sencilla pero no tanto su enfoque para fotografiarlas debido a que su posición no coincide con la del prisma.

Si se elige la iluminación casi normal, el resultado es sorprendente, pues la luz reflejada en ambas caras de las superficie de aire comprendida entre el prisma y el vidrio, se ve con franjas de interferencia paralelas, como era de esperar, pero la reflejada en la superficie del prisma que excede al vidrio, se ve sin interferencias pero menos brillante que los máximos de la zona referida. La interpretación del resultado según los *fits* es inaceptable por dos razones:

- En la superficie externa del prisma se refleja la luz, en contra de lo que afirmaba Newton.
- La única forma de interpretar tanto las bandas negras como el incremento de brillo en los máximos es aceptar una redistribución de la energía reflejada tanto en la base del prisma como en la del vidrio. O sea , que luz más luz puede dar tanto oscuridad como luz más intensa dependiendo de la diferencia de caminos de los dos rayos implicados.

Las láminas paralelas

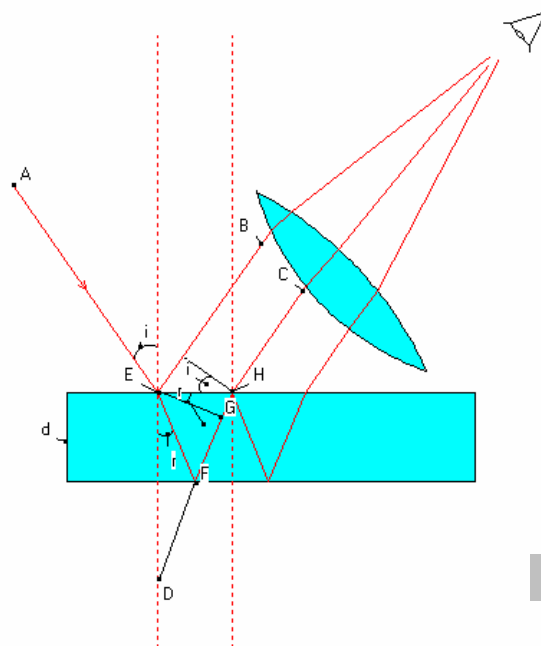


fig . 3.25

Consideremos una lámina estrecha de aire comprendida entre dos vidrios a la que llega el rayo AB. Como consecuencia de las múltiples reflexiones y refracciones saldrán en dirección al observador varios rayos coherentes. El rayo EF sufre en F un cambio de fase de 180° lo que supone una interferencia en oposición de fase entre EB y HC.

la diferencia de caminos ópticos entre los rayos AEB y AEFHC es :

$$\Delta = n (EF+EG) = 2nd \cos r,$$

y la diferencia fase correspondiente sería :

$$\delta = (2\pi/\lambda) \Delta + \pi$$

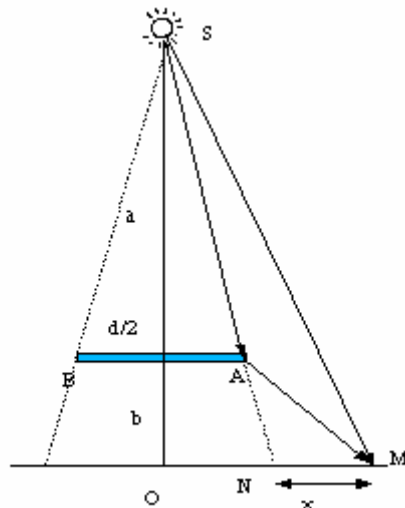
debido al cambio e fase del primer rayo al pasar del aire al vidrio. Para los demás rayos paralelos, mucho más atenuados, la diferencia de fase será la misma.

$$\delta =(2\pi/\lambda) \Delta$$

Estas diferencias de fase pueden darán máximos o mínimos según sus diferencias de caminos sean múltiplos enteros del tipo $m\lambda$ o de $(2m+1)\lambda/2$.

La difracción a través de cuerpos estrechos

fig . 3.26



Entre 1815 y 1818, sus pasos repiten los de Young, de cuyos logros, sólo tenía la referencia verbal de Arago. Repite La difracción por un cuerpo estrecho, y establece una relación teórica entre la distancia de las franjas al límite de la sombra geométrica, x , con la distancia del foco al obstáculo a y del cuerpo a la pantalla b y las experimentales y la longitud de onda de la radiación λ .

$$x = \sqrt{\frac{2\lambda(a+b)}{a}}$$

Haciendo la experiencia con luz blanca, concretando para la anchura de la primera franja oscura, obtuvo un valor medio para las longitudes de onda de 517,6 nm, que es un muy buen resultado. Aplicando su principio de superposición a la reflexión, deduce la igualdad de los ángulos $i = r$.

Su motivación por la coherencia aparece en su 'First Memoir'. Enfrentado al hecho de que dos fuentes luminosas no produzcan interferencias y una puntual sí, propone la no coherencia de las fuentes independientes.

...Si no hay dependencia entre los centros de vibración, el momento de salida del sistema de ondas no está conectado con el momento de salida de las ondas vecinas, porque ninguna causa que las engendra produce cambios simultáneos en dos fuentes luminosas. Es por ello que las líneas de acuerdo y destrucción variarán continuamente sus posiciones, y el ojo sólo tendrá sensación de luz uniforme. Es esto sin duda lo que nos ha impedido sin duda tan largo tiempo reconocer la influencia que los rayos de luz ejercen entre sí. (Fresnel, 1819)

La coherencia espacial descifrada por fin

Fresnel afrontó también con éxito el difícil problema de porqué los focos de luz deben ser muy estrechos. Razona para ello del siguiente modo:

Dado un foco de luz limitado por un agujero de radio $r = SS'$ que es interceptado por un

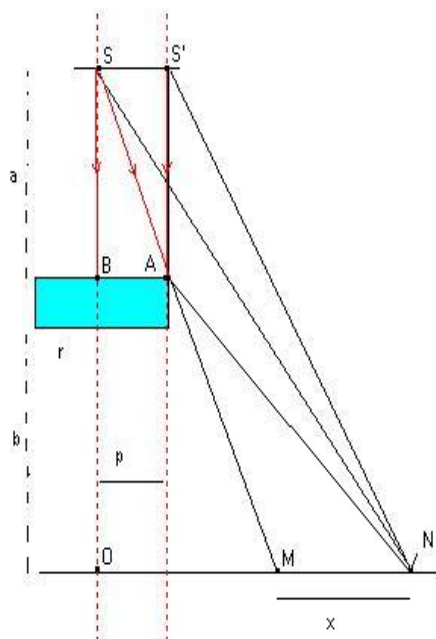


fig . 3.27

obstáculo, comparamos los caminos geométricos de caminos entre dos rayos que salen de S y S' y llegan a un punto M situado en una pantalla.

Si P es la diferencia de camino entre los dos rayos que salen de S y P' la de que salen de S', la perturbación resultante en M será parecida cuando $P-P'$ sea pequeño comparado con la longitud de onda.

$$P = SA + AM - SM$$

$$P' = S'A + AM - S'M$$

luego al aplicar Pitágoras sucesivas veces se obtiene:

$$P'-P = (S'A-SA) + (SM-S'M) = (xr + br^2/2a) / (a+b)$$

Es fácil ver que si el agujero es grande (alto valor de x), $P'-P$ también lo es , y como sabemos hay un gran desfase que hace imposible que se superpongan dos máximos (o dos mínimos).

Sin embargo, si x es pequeño, la diferencia $P'-P$ también lo es , y se consigue que en N las franjas de luz u oscuridad sean muy nítidas.

Los espejos de Fresnel

Durante su fase de trabajo con las interferencias, Fresnel optimizó los dispositivos para conseguir interferencias. Uno de los más conocidos, sus espejos, tiene un motivo didáctico: para muchos , aunque el resultado de la doble rendija era espectacular su mecanismo resultaba oscuro por la posible interacción entre la luz incidente, los bordes del obstáculo y la difracción en cada rendija.

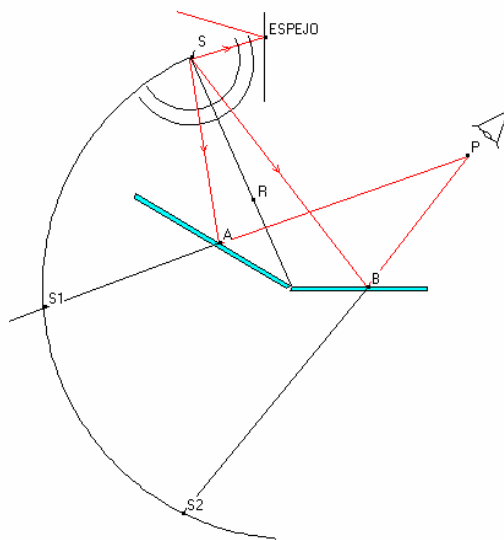


fig . 3.28. Los espejos de Fresnel

En el montaje original los espejos forman casi 180° , los rayos incidentes de S llegan casi tangenciales a las zonas de ambos espejos muy próximas al centro del círculo (contacto de los dos espejos). Ello consigue la condición de que las direcciones de los rayos que interfieren sean casi paralelas, que la diferencia de caminos responsable de la interferencia

$$\Delta = S_1P - S_2P$$

pueda hacerse muy pequeña (él dice que, como máximo, esta diferencia debe ser de seis ó siete longitudes de onda), y que los focos de luz, en este caso puntuales ,fueran coherentes. El resultado es sorprendentemente claro sin necesidad de una doble rendija.

El Principio de Huygens- Fresnel

Sabido es que Huygens enuncia su principio de que para construir la posición inmediata de una perturbación lumínica, basta considerar que dicho frente es emisor de infinitas onditas secundarias y que el efecto de todas ellas sólo se percibe en otro frente paralelo más distanciado. O sea, que de las infinitas perturbaciones sólo se quedaba con la parte de ellas común a la *envolvente*. Así explicaba (solamente) la propagación *rectilínea* de los rayos de luz. (Personalmente opino que Huygens ya vislumbró una especie de interferencia entre esas ondas al considerar que su efecto sólo era *apreciable* en las direcciones rectilíneas).

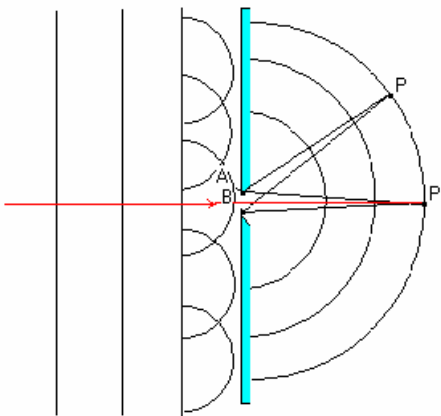


fig . 3.29. Rendija estrecha

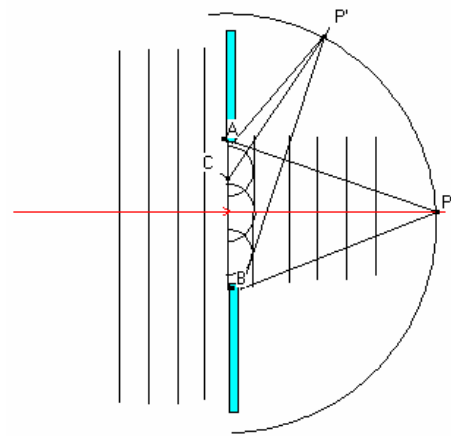


fig . 3.30. Rendija ancha

El gran avance de Fresnel fue afirmar que *todas* las onditas contribuyen a la formación del siguiente frente. Esto toma una peculiaridad especial en el caso de que el frente de ondas esté limitado por una pequeña rendija. Ahora sólo los infinitos focos secundarios que deja pasar la rendija son activos para interferir. Analizando la figura, si la longitud de la onda incidente (espaciado entre planos), es mucho mayor que el ancho de la rendija,

$$\lambda \gg AB$$

si partimos del punto central en línea, $\Delta = 0$. Si vamos recorriendo un arco de circunferencia con este radio, en el mejor de los casos las diferencias de caminos $\Delta_{\max} = BP - AP$ serán mucho menores

que ésta, y puesto que las onditas estaban inicialmente en fase, el desfase correspondiente de los rayos seguirá siendo constructivo en grado variable.

Otra situación muy distinta es cuando la rendija AB es muy ancha, $\lambda \ll AB$

porque sólo en la región frontal a la rendija se puede conseguir que $\Delta_{\max} \ll \lambda$. En cualquier otro punto alejado de la dirección central, $P'B - P'A$ crece hasta valores muy grandes pasando por valores enteros y fraccionarios de la longitud de onda. Otro tanto sucede con las diferencias $P'C - P'A$, etc... De ello se deduce que en puntos externos tales como P' , las interferencias de las onditas secundarias se destruyen y no habrá ninguna perturbación neta, por lo que a los efectos se puede considerar que los rayos de luz viajan en línea recta.

No fue fácil llegar a expresar matemáticamente esta intuición:

...ondas elementales nacen en cada punto a lo largo del arco del frente de las ondas que pasan por el difractor e interfieren mutuamente. El problema fue determinar la vibración resultante producida por todas las onditas que alcanzan cualquier punto detrás del difractor. Las dificultades matemáticas fueron formidables, y encontrar una solución requirió varios meses de esfuerzo (Huygens, 1992)

Lo que es importante de esta exposición es que la difracción actúa *siempre*. Si el frente de onda no está limitado por un obstáculo, la suma de las onditas secundarias da rayos lineales, mientras que si sólo se deja pasar una porción estrecha (como es el caso de telescopios, microscopios, rendijas,...) la interferencia de las ondas da como resultado que el rayo se abra en un cono de franjas oscuras y brillantes. Es Fresnel el que demuestra que, del mismo modo que en las interferencias por dos rendijas, la aparición de los fenómenos de difracción supone también una redistribución de energía del foco de luz en el espacio de observación.

El algoritmo de Fresnel

Hasta 1817, la aplicación del principio de interferencia se limitaba a sólo dos rayos para explicar o bien máximos o bien mínimos, pero no podía explicar lo que ocurría en los casos intermedios. Parece que en septiembre de 1817 aprendió a sumar varias ondas armónicas con fases arbitrarias. El conocido algoritmo del vector giratorio de Fresnel válido para sumar dos vibraciones de igual frecuencia y distintas fases iniciales, lo aplicó después con éxito a la composición de infinitas fuentes con desfases variables aplicando el cálculo integral a sus placas zonales. Recordemos el citado algoritmo:

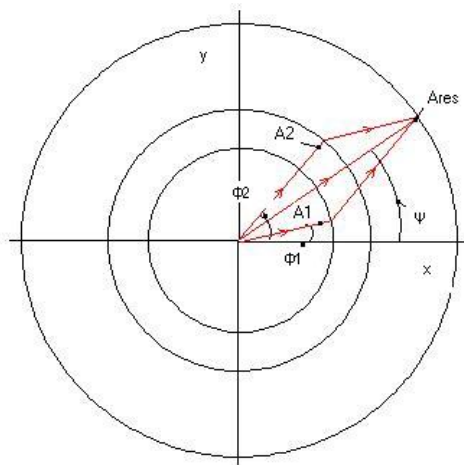


fig . 3.31

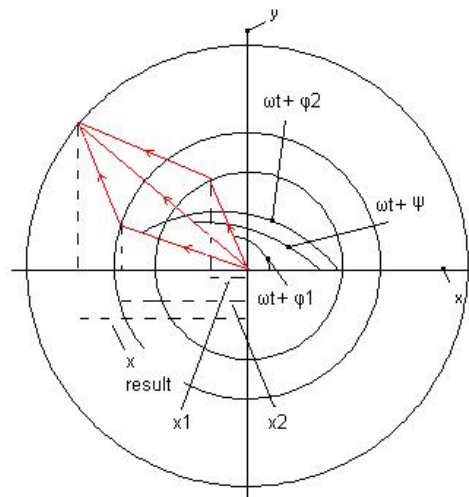


fig . 3.32

Dados dos MAS de igual frecuencia y fases iniciales distintas,

$$x_1 = A \cos (\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A \cos (\omega t + \varphi_2)$$

su composición es otro MAS de igual frecuencia ω , de una amplitud suma vectorial de las amplitudes iniciales y una nueva fase inicial Ψ

$$x_R = A_R \cos (\omega t + \Psi)$$

El algoritmo representa vectores giratorios en sentido antihorario, situados en el instante inicial en las posiciones angulares marcadas por sus respectivos desfases que describen círculos de radio A_1 y A_2 con velocidad angular ω . El gráfico de la izquierda representa el instante cero y el otro, un tiempo t arbitrario en que los vectores habrán girado un ángulo ωt .

Sus proyecciones instantáneas sobre el eje x darán la elongación respecto de sus orígenes, y la suma de ambas $x_1 + x_2$ dará la elongación x_R resultante de la interferencia de ambas. Unas sencillas proyecciones, aplicando Pitágoras dan el conocido resultado:

$$A_R^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$\Psi = \arctg ((y_{10} + y_{20}) / (x_{10} + x_{20})) =$$

$$\Psi = \arct [(A_1 \sin \omega t + A_2 \sin \omega t) / (A_1 \cos \omega t + A_2 \cos \omega t)]$$

Ya estaba en condiciones de investigar resultados con infinitud de osciladores, que es a lo que llamamos *difracción*. Bastaba una suma vectorial en la que se consideraban los sucesivos desfases, para obtener la amplitud y la fase resultantes. En un ejemplo de seis focos desfasados un mismo ángulo, tenemos la vibración resultante.

Era razonable añadir la condición de que la intensidad con la que llega una ondita secundaria a un punto, dependa del ángulo que forma el rayo que incidente al foco de la ondita con la línea que une dicho foco con el punto a iluminar

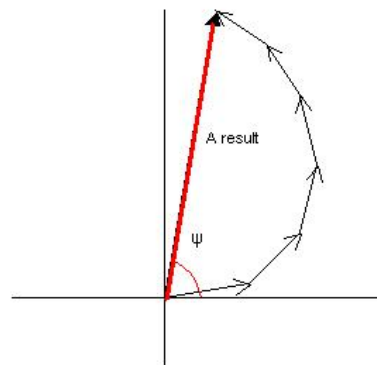


fig . 3.33

El nuevo paradigma superaba al de Young en cada nueva revisión. Mientras que éste explicaba la difracción de una rendija estrecha por la interferencia de los rayos extremos procedentes de A y B, que producían las hipérbolas, Fresnel proponía que aunque A y B eran los más intensos, el efecto global era debido a los infinitos focos pues si se estrechaba la rendija, se ensancha el haz incluyendo la porción de luz interna.

Esta audaz hipótesis era al fin y al cabo una nueva receta más profunda que sí explicaba por ejemplo que la materia perturbada, reirradia ondas de la misma frecuencia, pero era incapaz de explicar por qué reemitían los focos secundarios en el aire o el vacío. Tenía que admitir este comportamiento del éter sin más, al que debió añadir nuevas correcciones para que las experiencias se acordasen al modelo. Poco más tarde, el alemán Gustav Kirchhoff daría la solución matemática completa a partir de ecuación de ondas.

Las zonas de Fresnel

Son la máxima expresión de la óptica de Fresnel (1819), y aunque los conceptos físicos que se manejan son sencillos, el necesario desarrollo de integrales dificulta a menudo la comprensión de sus conclusiones. Puesto que su exposición está en cualquiera de los textos clásicos, remito a ellos al lector minucioso. Lo que destacaremos en estas líneas es la perspectiva que permita ver los pasos principales, para lo que sí nos parece crucial esta cuestión.

El razonamiento de Fresnel es que si se tiene un foco puntual de luz emisor de ondas esféricas, su efecto en un punto P situado a una distancia x , puede obtenerse o bien por la ecuación de una onda esférica

$$E = \frac{E}{d} \cos(\omega t - kd)$$

O bien por otro método mucho más laborioso, considerando una esfera de radio R que encierra el foco en su centro y una serie de zonas obtenidas por la intersección de pequeñas esferas con centro en P de radios crecientes en media longitud de onda desde PH , con la esfera inicial que encierra el foco de luz Z . Estas zonas Σ , sumarán sus efectos en P hasta obtener la amplitud y la fase resultante.

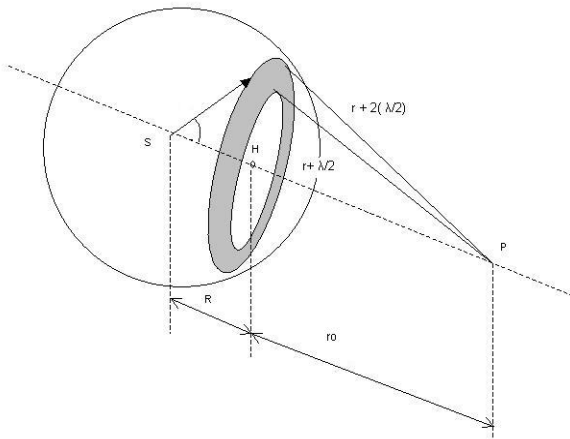


fig . 3.34

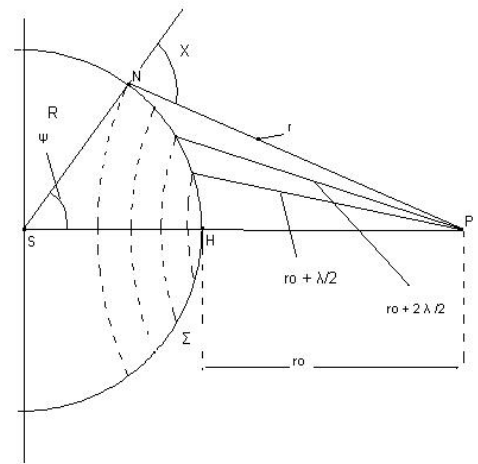
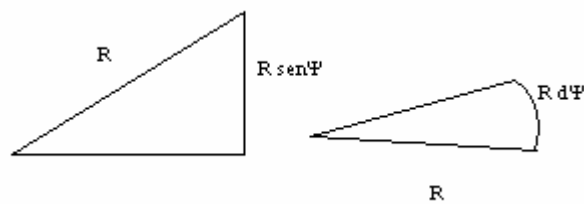


fig . 3.35

En la fig 2, dada una zona cualquiera, se subdivide a su vez en infinitud de subzonas de área



$$d\Sigma = 2\pi R \sin \Psi (R d\Psi)$$

Cada una de ellas contribuye con una amplitud diferencial

$$dE = \frac{E_0}{R} \frac{1}{r} \cos[\omega t - k(R+r)] f(X) d\Sigma$$

sustituyendo el valor $d\Sigma$

$$dE = 2\pi \frac{E_0}{d} \cos[\omega t - k(R+r)] f(X) dr$$

La contribución total de la zona Σ comprendida entre dos arcos r_n y r_{n-1} será se obtiene de una integral entre los límites indicados.

$$E_n = (-1)^{n+1} \frac{2\pi E_0 \lambda f(X)}{D} \cos(\omega t - kD)$$

como vemos cada zona se diferencia de la siguiente en el signo n y en el factor de oblicuidad.

Si calculamos la contribución de todas ellas en el punto P , obtenemos:

$$E_P = E_1/2 + (E_1/2 - E_2 + E_3/2) + \dots = E_1/2$$

¡ E_1 contribuye a la mitad de la amplitud total!

Y finalmente se puede expresar la amplitud resultante.

$$E_P = \frac{E_0 \lambda}{D} f_1(\chi) \cos(\omega t - kD - \frac{\pi}{2})$$

Las lentes zonales de Fresnel

En 1871, Lord Rayleigh (Howard, 1964),¹ ideó una aplicación de las zonas de Fresnel. Si dibujamos sobre un acetato transparente círculos concéntricos de radios proporcionales a las raíces cuadradas de los números enteros consecutivos, y pintamos alternadamente de negro cada una de las dos series, se obtiene un resultado paradójico, pues al iluminarlas con un foco de luz, la imagen que proyectan en determinadas posiciones de una pantalla, es mucho más luminosa que en ausencia de estos círculos.

¹ Lord Rayleigh. *Notebook*, April 11, 1871

En realidad lo único que hemos hecho es eliminar toda la serie par o impar de las zonas de Fresnel como hemos visto producen entre sí desfases destructivos de media longitud de onda de modo que la serie que queda, está constituida por zonas que se refuerzan totalmente y el efecto es similar al de una lente convergente.

Dada la figura, donde a es la distancia del foco al frente de ondas, a' la mínima distancia del frente al centro de la pantalla, λ la longitud de la onda el área de una zona concreta, ρ una de las zonas, r y r' las distancias del punto M al eje central en P y P', si calculamos las diferencias de camino:

$$(r+r') - (a+a') = n(\lambda/2) \text{ donde } n = 1,2,3,\dots$$

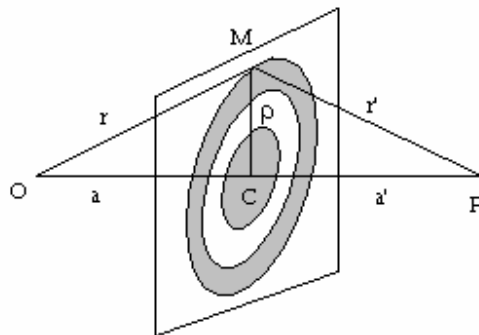


fig. 3.36

$$r+r' = \left[(a^2 + \rho^2)^{\frac{1}{2}} + (a'^2 + \rho^2)^{\frac{1}{2}} \right]$$

donde, tras desarrollar las raíces aplicando el binomio de Newton y teniendo en cuenta que $\rho \ll r$ y r' obtenemos:

$$(r+r') - (a+a') = \frac{1}{2}\rho^2\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{a'}\right) = m\lambda/2$$

donde despejando, obtenemos:

$$\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{a'}\right) = m\lambda/\rho^2 = 1/f^*$$

que recuerda a la fórmula de las lentes, donde podemos asignar la distancia focal f^* a la expresión :

$$f^* = \rho^2/m\lambda$$

Merece la pena detenerse en este resultado, en mi opinión uno de los más bellos de la Óptica: la lente así obtenida eliminando por ejemplo las zonas de orden par (fig b), no sólo consigue una mayor iluminación que un diafragma del mismo diámetro, sino que además, ¡ puede enfocar objetos!

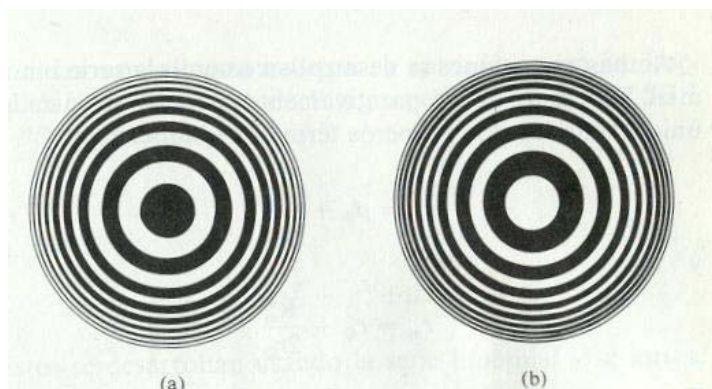


fig . 3.37

Éste es otro ejemplo de un fenómeno espectacular del que sólo hasta fechas muy recientes se le ha sacado utilidad. En efecto, como el vidrio no es transparente a ciertas longitudes de onda como los RX una cámara de fotos convencional no dará buenas imágenes de objetos que las radien. Una solución es quitar el objetivo del frontal y poner en su lugar un pequeño orificio que haga de cámara oscura, o mejor un negativo de película en el que se encuentre una pequeña lente zonal (del orden de 0,5-1 mm). La gran luminosidad conseguida permite la obtención de fotografías de poca definición.

Aplicación a un agujero circular

La distribución de intensidad luminosa en una pantalla situada próxima a un diafragma circular estrecho, se distribuye en anillos concéntricos al agujero . Diciéndolo en otras palabras, la imagen de un punto luminoso, no es en rigor otro punto como asegura la óptica geométrica sino una serie de anillos concéntricos. El ejemplo más incómodo son las manchas de Airy que una estrecha produce en una pantalla cuando se observa a través de un telescopio. Si las estrellas están muy próximas, las imágenes de ambas solapan y no es posible resolver las imágenes individuales.

Los cálculos de Fresnel para interpretar los resultados necesitan unas integrales elaboradas cuyo tratamiento excede los propósitos de este artículo, pero no sucede así con las observaciones a lo largo del eje central.

Si en lugar de una frente esférico se selecciona la parte de éste que atraviesa un agujero circular, el cómputo de nuestras zonas es mucho más sencillo. Dividiendo por ejemplo cada zona que corresponde a radios PH_1 , PH_2 , ... distanciados media longitud de onda (sus correspondientes

amplitudes estarán desfasadas π radianes) en tres subzonas que darán contribuciones desfasadas $\pi/3$, podremos utilizar el algoritmo del vector giratorio.

La primera zona será la más próxima al centro, mientras que la amplitud resultante de sus tres subzonas será el radio OA:

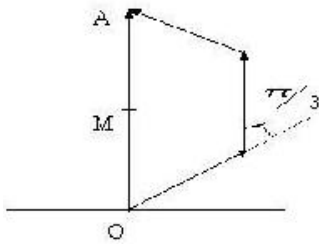


fig . 3.38

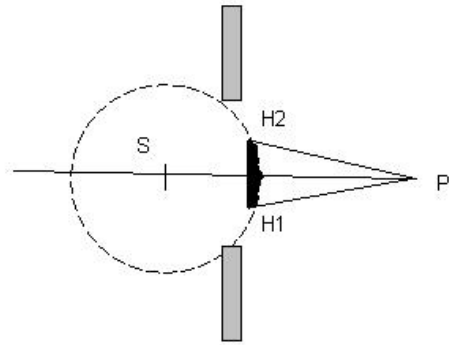
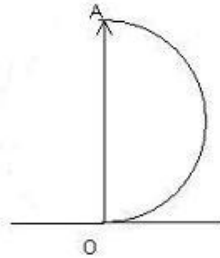


fig . 3.39

Si el número de subzonas fuera infinito, la construcción sería un semicírculo con igual resultado OA como representa la figura adjunta..

Para la siguiente zona, contigua a la primera y más externa, la fase se incrementa de nuevo en π con una amplitud media menor que la anterior, luego el resultado será otro semicírculo de radio menor hasta el punto B. La suma de las dos zonas será el radio OB, casi despreciable. Así sucesivamente, dependiendo el número de zonas que quepan entre el agujero y el punto P, se tendrá todo el abanico de posibilidades hasta OM.

El resultado es sorprendente, pues según acercamos P según la línea PS hacia el diafragma, iremos pasando sucesivamente por máximos y mínimos relativos de intensidad lumínica.

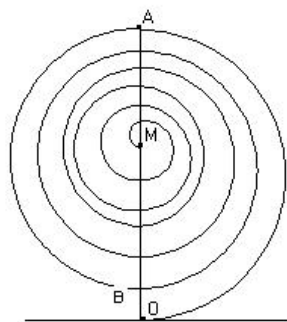


fig . 3.40

Obstáculo circular que ilumina el eje

En uno de los ejemplos más interesantes de las discusiones científicas, es de destacar la polémica que inicia el matemático y miembro de la Academia Poisson, partidario de las tesis emisionistas, que integraba comisión deliberadora para el premio sobre la Difracción, cuando a partir del modelo matemático que propuso Fresnel, deduce el aparente absurdo de la aparición de una mancha brillante en el centro de la sombra producida por una pantalla circular opaca. El matemático francés Poisson, partidario de la teoría corpuscular de la luz, al analizar las matemáticas anteriores, razonó del siguiente modo:

Si el diafragma anterior lo tapamos con un tapón macizo, el resultado en cualquier punto externo será nulo, luego la amplitud cero se puede obtener sumando

$$A_{\text{res}} = 0 = A_{\text{agujero}} + A_{\text{tapón}}$$

De donde se deduce que

$$A_{\text{agujero}} = - A_{\text{tapón}}$$

Luego el efecto del tapón, enfrentado ya sin diafragma al foco, ¿sería producir la misma luz en P que el diafragma!

Arago, recogiendo el desafío, diseñó el correspondiente *Experimentum Crucis* y para asombro de la época, demostró su existencia. La única dificultad es que el foco puntual y la pantalla deben alcanzar distancias de incluso centenares de metros si el obstáculo circular es considerable. Con una pequeña moneda situada a 20 m de un foco laser, se puede encontrar la mancha brillante en el centro de la sombra a otros 20 m. A partir de entonces, el escéptico Poisson se hizo un ferviente partidario de las nuevas tesis.

Lo que entonces supuso un diseño experimental difícil, hoy es una experiencia de cátedra fácilmente reproducible en cualquier laboratorio escolar con un Laser He-Ne. La hemos conseguido focalizando el laser de Helio-Neon mediante una lente convergente de 5cm de distancia focal y colocando a 1 m del foco una bolita de rodamiento de 0,4 cm de diámetro apoyada en el extremo de un clavo pequeño, y la pantalla a 6 m de la bola, obteniendo el resultado

adjunto.

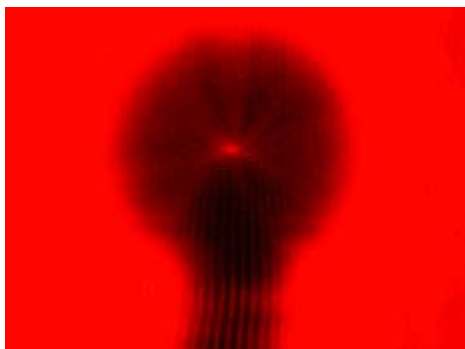


fig. 3.41 Mancha de Poisson en nuestro centro

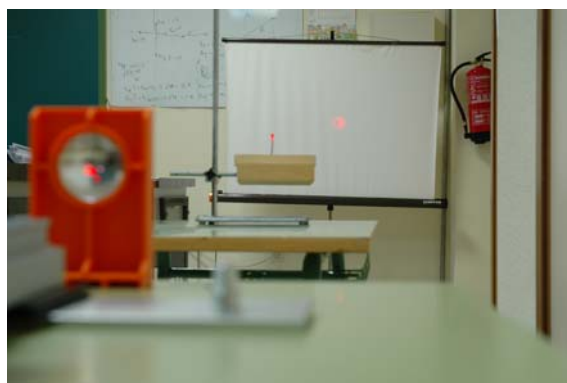


fig. 3.42 Montaje para su registro

Difracción de Fraunhofer por una rendija

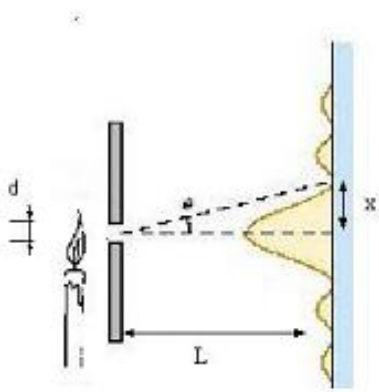


fig . 3.43



fig . 3.44

Cuando una rendija se hace lo suficiente estrecha, las sombras que un foco hace de ésta sobre una pantalla, dejan de reproducir la forma real pues el pincel de luz se abre y se observan máximos y mínimos de intensidad más espaciados que los que producen rendijas o focos casi puntuales. De hecho, no hay nada que diferencie ambos fenómenos, pues mientras que la interferencia se explica a partir de dos rayos, la difracción necesita la composición de infinitos focos secundarios.

Aunque el fenómeno siga explicándose a partir de las onditas secundarias de Fresnel, la matemática de los fenómenos de difracción se simplifica mucho si centramos la atención en el caso de que tanto el foco como la pantalla, estén lo suficientemente lejos de la rendija como para considerar que los rayos sean paralelos. Este es el tratamiento que hizo el alemán Fraunhofer en 1821 colocando en los focos de sendas lentes convergentes de un telescopio el foco de luz S y la pantalla P. De este modo conseguía rayos paralelos a la entrada y salida de la rendija en distancias

cortas y además, gracias a la concentración de la luz que conseguían, se mejoraba sensiblemente la observación.

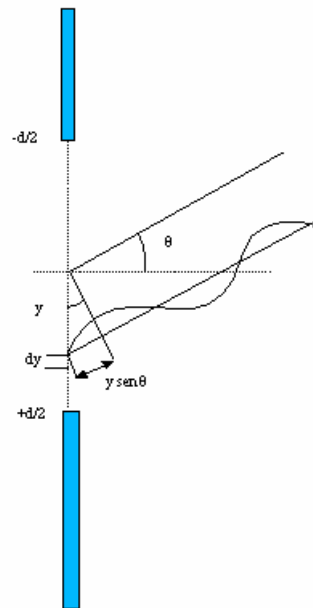


fig. 3.45

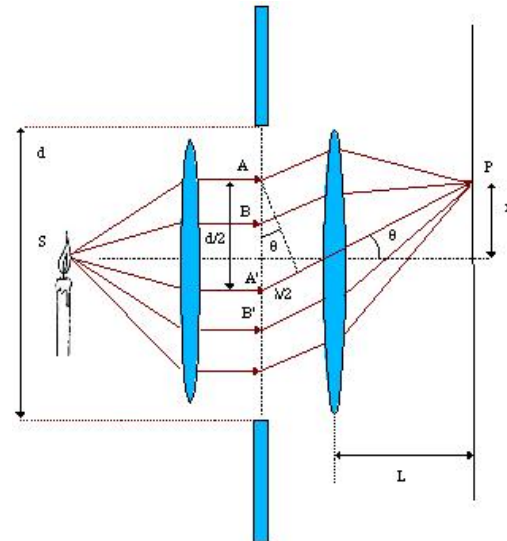


fig. 3.46

Este problema tiene dos partes: de una, calcular la posición de los máximos y mínimos en la pantalla, y de otra, expresar la amplitud y la intensidad de la figura resultante en cada punto de la pantalla.

La posición de los mínimos y los máximos:

Para la primera cuestión considerando la interferencia de la pareja de rayos AP y A'P, BP y B'P,...que llegan al primer *mínimo* P de la pantalla. La diferencia de caminos entre las infinitas parejas de rayos será:

$$d/2 \sin \theta = (2n+1) \lambda/2$$

Simplificando, llegamos a que los *mínimos* ocurren para

$$d \sin \theta = (2n+1) \lambda$$

Para el primer mínimo

$$(n = 0), d \sin \theta_1 = \lambda \quad \text{con} \quad \sin \theta_1 = x_1/L$$

Para el segundo ($n = 1$)

$$d \sin \theta_2 = 3 \lambda \text{ con } \sin \theta_2 = x_2/L$$

El máximo central, de anchura doble a los demás, estará en el centro. Los demás máximos estarán situados a distancias intermedias $x_2 - x_1$ de los mínimos.

$$(x_2 - x_1)/2 = L (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)/2$$

El tratamiento de la intensidad:

Supuesta una onda que llega al centro de una rendija de anchura d , con amplitud A_s , la amplitud A de la onda en cada punto P de la pantalla, se obtiene sumando todas las contribuciones elementales dy de la rendija entre los intervalos $-d/2$ y $d/2$, considerando que la amplitud de cada elemento dA , será directamente proporcional a su longitud dy , e inversamente proporcional a la anchura d de la rendija.

Recordando que el desfase entre la onda central y la que sale de un elemento a distancia y es :

$$\Phi = k \Delta x = (2\pi/\lambda) \Delta s = (2\pi/\lambda) (y \sin \theta)$$

La integral a calcular, será:

$$A = \int_{-d/2}^{d/2} \sin(\omega t + \varphi) dy$$

en la que si hacemos el cambio de variable

$$\beta = (\pi d/\lambda) \sin \theta$$

$$A = \frac{A_o}{2\beta} \int_{-\beta}^{+\beta} \sin(\omega t + j) dj$$

Con el resultado:

$$A = \frac{A_0}{\beta} \sin \beta \sin(\omega t)$$

Y, finalmente, como sabemos que la intensidad es proporcional al cuadrado de la amplitud, llegamos a la conocida expresión

$$I = I_0 (\sin^2 \beta) / \beta^2$$

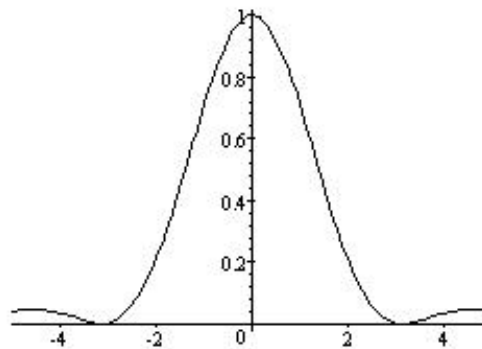


fig . 3.47

Como se ve en la gráfica de la expresión, el resultado previsto, coincide bastante bien con la experiencia a pesar de las aproximaciones. Para rendijas anchas, el pico central sube, pero se hace más estrecho, mientras que si estrecha, el pico de intensidad desciende y el ancho del máximo central aumenta.

Tratamiento completo de la doble rendija

Cuando las rendijas son lo suficiente estrechas como para que la difracción sea observable, y estén además muy próximas entre sí (del orden de 0,05 cm), los efectos de la difracción y la interferencia se superponen. Los máximos de interferencia se ven muy próximos y su intensidad viene modulada por la gráfica anterior. Recordemos que la intensidad de dos focos coherentes puntuales que interfieren en la doble rendija ideal viene dada por :

$$I = 4 I_0 \cos^2 (\pi d \sin \theta) / \lambda$$

Si hacemos $\Phi = (2\pi d \sin \theta) / \lambda$, queda:

$$I = 4 I_0 \cos^2 \Phi / 2$$

Pero si introducimos la modulación indicada en el apartado anterior, tendremos el resultado definitivo

$$I = 4 I_0 (\text{sen}^2 \beta) / \beta^2 \cos^2 \Phi/2$$

Donde el factor Φ depende de la distancia entre rendijas, y el β de la anchura de cada rendija.

Componiendo de un lado la gráfica de la difracción por una rendija, y de otro la de las interferencias de focos cuasipuntuales,

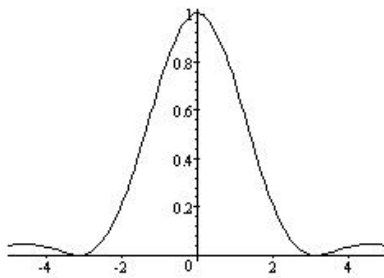


fig . 3.48

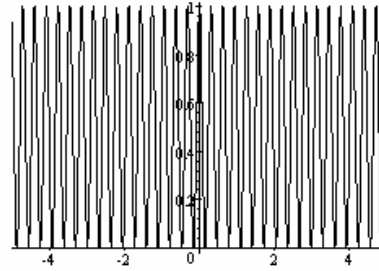


fig . 3.49



fig . 3.50



fig . 3.51

Se obtiene finalmente la resultante de ambas:

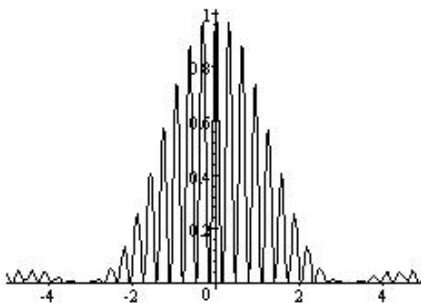


fig . 3.52

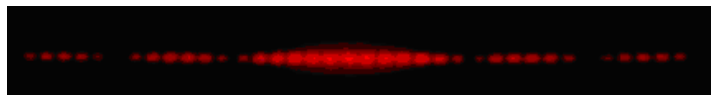


fig . 3.53

5.3.4 La polarización de la luz

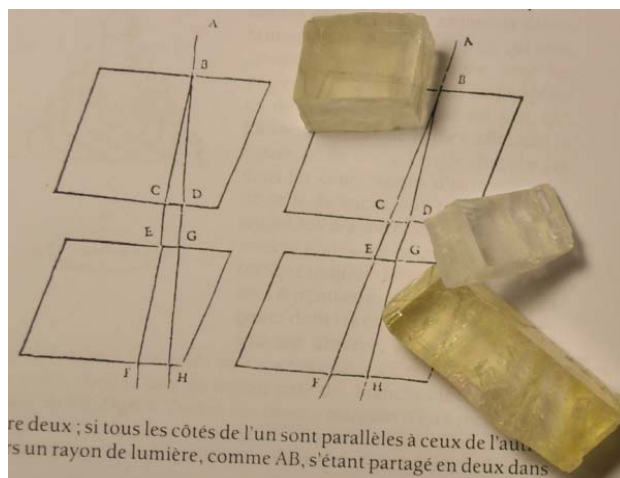


fig . 3..54

Los inicios

El Espato de Islandia es un material que por percusión, se escinde fácilmente en otros romboedros de idéntica geometría. Tiene un eje óptico que bisecciona el punto intersección de los tres planos que a su vez, determinan tres aristas en ángulos obtusos de $101^{\circ} 52'$. Llamaremos *eje óptico* a cualquier línea paralela a la línea y plano principal a aquél que lo contiene y es perpendicular a dos caras paralelas.

Se dice que ya lo usaron los vikingos para guiarse en su supuesto viaje a Norteamérica aprovechando la propiedad de la polarización de la luz del cielo aunque su introducción en el patrimonio científico se inicia en el año 1669 gracias al médico danés Erasmi Barhtolinus (1625-1698), suegro de Römer, que ya refiere en un texto de 60 páginas las extrañas propiedades de una forma de calcita que cristaliza en el sistema hexagonal, clase romboédrica, descubierta en Islandia, a través de la cual se veían dobles las imágenes de los objetos. Relata que un rayo de luz que llega a la superficie de un cristal, se escinde en dos rayos de propiedades distintas. Mientras que uno de ellos (el rayo ordinario) mantiene su dirección constante a pesar de girar el cristal, el otro (rayo extraordinario) gira alrededor del primero. Bartholinus midió además los índices de refracción de estos rayos obteniendo que el del ordinario era constante para cualquier orientación, mientras que el del extraordinario cambiaba con el ángulo de incidencia (Bartholius, 1991).

Con estos sencillos conceptos y un refractómetro, Huygens retoma en 1678 el estudio de este problema, que publicará más tarde en la segunda parte de su '*Traité de la Lumière*' (1690). Aún hoy asombra hasta dónde pudo llegar con un mínimo soporte de instrumentos científicos. Tapando la cara de una superficie del mineral de modo que sólo permitía el paso de un estrecho haz de luz solar, identificó que se desdoblaban en un rayo ordinario y otro extraordinario, que llamó así debido a que al girar el mineral sobre su base, el primero permanecía inalterado mientras que el segundo giraba paralelamente a esta dirección. Pudo medir con suficiente precisión el ángulo de refracción de ambos rayos y obtuvo el resultado de que mientras que para el rayo ordinario se verificaba que $\frac{\sin i}{\sin r} = n = \text{cte.}$, para el rayo extraordinario no sucedía igual, pues la refracción variaba dependiendo de dirección y de la cara sobre la que incidía el rayo inicial.

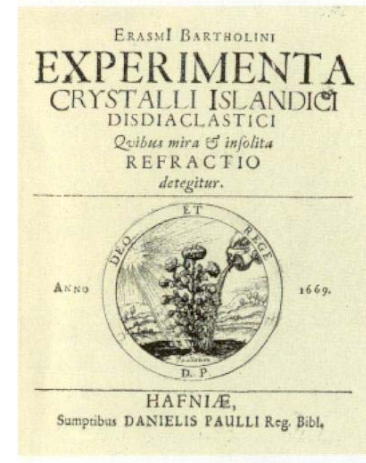


fig. 3.55 Libro de Bartholinus

En trabajos ulteriores combinó parejas de estos cristales y comprobó que su colocación sucesiva no consigue nuevos desdoblamientos, mientras que si se hace de modo inverso se anulan los efectos del primero. Podemos resumir pues sus observaciones:

- existe un eje óptico en este cristal relacionado con la geometría molecular, que es una dirección y no una línea que pasa por el vértice que delimita aristas que forman entre sí ángulos obtusos de 102° y caras de fácil hendidura ("*cleavage*"). Un plano que lo contiene, y que además es perpendicular a dos caras paralelas, se llama *sección principal*.
- Si un haz incide sobre una cara paralela a través de una sección principal en un ángulo arbitrario, se desdobra en dos rayos que forman dos ángulos de refracción distintos. Si se gira el cristal respecto de esta dirección, el rayo ordinario permanece en ella mientras que el otro gira a su alrededor. Ambos rayos tienen comportamiento distinto cuando se analiza su reflejo en un vidrio. Se dice pues que están *polarizados* de modo distinto.

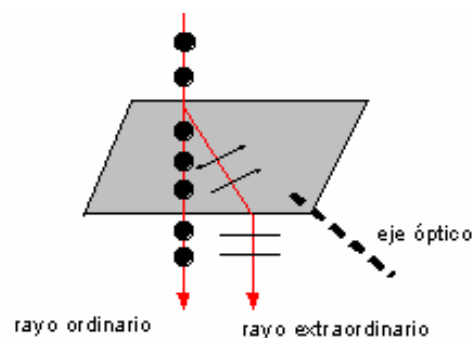


fig . 3.57

- Si se coloca a continuación un cristal dispuesto del mismo modo, mientras que el rayo ordinario no se desvía, el segundo se desvía el mismo ángulo. El efecto es el mismo que si hubiéramos hecho doble el espesor del cristal inicial.
- Si se coloca un segundo cristal rotado un ángulo de 45° , ambos rayos ya no están en el mismo plano principal, y cada uno se desdobla en otros dos

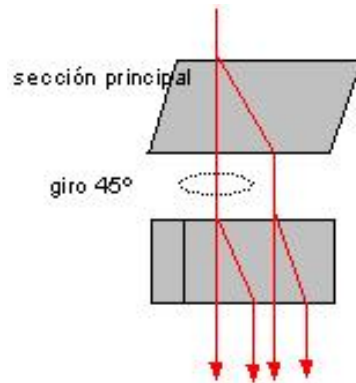


fig . 3.58

- El índice de refracción del ordinario permanece constante, pero el del extraordinario varía según el ángulo de incidencia
- Si se colocan sucesivamente dos romboedros en el mismo sentido, no aparecen más rayos. Sólo se separan entre sí. Sin embargo, si colocan invertidos se reencuentran de nuevo.

Sus conclusiones de acuerdo con su teoría de las ondas secundarias, fueron que cada punto del medio origina onditas que se propagaban como esferas o como elipsoides de revolución siendo por tanto distinta la velocidad y la dirección de los dos rayos que inciden en una cara arbitraria. Sólo en dos direcciones concretas, la situación se hacía más sencilla: aquella que coincide con la dirección del eje óptico, en la que la velocidad de los esferoides y elipsoides es la misma, y aquella perpendicular a dicho eje en la que el elipsoide avanza a mayor velocidad, pero ambos rayos se superponen en la misma dirección. Bajo incidencia normal, el resumen de las trayectorias de ambos rayos sería el siguiente:

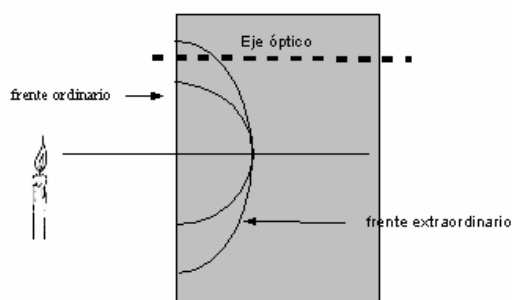


fig . 3.59

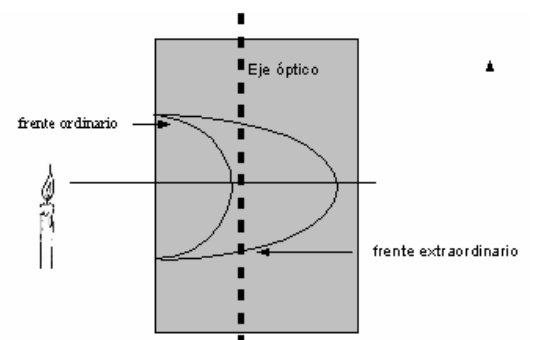


fig . 3.60

Cuando la incidencia es oblicua, la envolvente de ambos frentes es paralela pero la dirección de ambos rayos se bifurca a lo largo del medio, lo que da lugar a que se puedan visualizar claramente ambos rayos. Es decir que si enviamos por ejemplo un delgado pincel de haz de luz laser, se ve como ambos rayos están separados a la salida del cristal, y una vez de nuevo en el aire, viajarán paralelos.

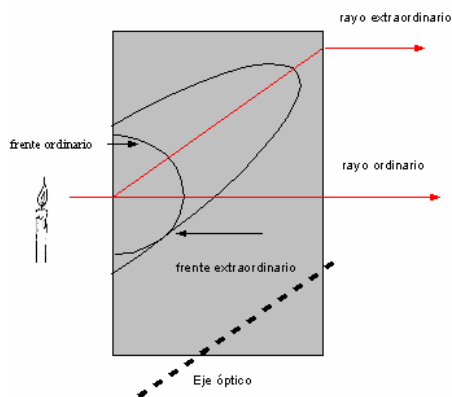


fig . 3.61

Tras estas acertadas conclusiones, su texto prosigue ingeniosos desarrollos en los que reconoce su incapacidad para interpretar el origen de estas ondas

*.....Cuando se considera que los rayos **ce** y **dg** permanecen los mismos, depende de la posición que se de al trozo inferior , para dividir cada uno en dos o no dividirlo, allí donde el rayo **ab** se divide siempre.; parece que estamos obligados a concluir que las ondas de luz, por haber atravesado el primer cristal, adquieren cierta forma o disposición por la cual , encontrando la estructura del segundo cristal, en cierta posición, puedan excitar las dos diferentes materias que sirven a las dos especies de refracción; y encontrando al segundo cristal en otra posición, no pueden excitar más que a una de las dos materias. Pero para decir cómo se hace esto, no he encontrado hasta ahora nada que me satisfaga. (Mais pour dire comment cela se fait, je n'ai trouvé jusqu'icy rien que me satisfasse...).*

De hecho el obstáculo era insalvable pues su concepción de las ondas de luz como longitudinales, y el intento de explicar la existencia de dos velocidades distintas para la luz como la existencia de dos éteres distintos, le llevaron a pensar que era el medio el que modificaba el comportamiento de la luz incidente.

Su contemporáneo Newton, aunque sólo trabajó este tema superficialmente, fue más agudo al responsabilizar al rayo incidente de su comportamiento a través del cristal. En su estilo de reducir al mínimo las hipótesis gratuitas, sugiere que de los cuatro lados del corpúsculo luminoso, una pareja tiene estados de polarización, y la otra el opuesto, de ahí el término “*polo*” que

recogió Malus y que ha llegado así a nuestros días, ambos dotados de fuerzas que interaccionan con el cristal y producen las desviaciones referidas.

La reflexión polarizada

Tras las investigaciones de Huygens sobre la luz polarizada, el problema continuó insoluble más de 100 años hasta que el ingeniero militar francés *Etienne Louis Malus* (1775-1812), recién llegado de la campaña militar de Napoleón en Egipto, se presentó al premio sobre la doble refracción de la luz que convocaba la Academia Francesa de Ciencias en 1809. Como él mismo refiere, al observar la luz crepuscular reflejada en una ventana del palacio de Luxemburgo, a través de un cristal de Espato de Islandia, se percató de que a medida de que giraba éste, una de las imágenes dobles del espato, desaparecía hasta su extinción. Al principio achacó a la atmósfera vespertina este hecho, y obligado por la noche a abandonar la observación, repitió las experiencias a la luz de una vela cuya luz reflejaba en cristales o en una superficie de agua, y obtuvo el método más sencillo de obtener y analizar la luz polarizada mediante la incidencia de la luz en un ángulo conveniente sobre un espejo.

Si la luz reflejada en un primer espejo no metálico (sirve un vidrio cuya cara inferior esté pintada en negro) o una superficie dieléctrica pulida como el mármol, bajo un ángulo de 57° favorable, o en una superficie acuosa bajo 52° , se hacía llegar a otro bajo el mismo ángulo, se observaba que si la orientación del segundo es paralela, la intensidad con que emerge de él, se refuerza a su salida, pero si el segundo espejo se hace rotar alrededor de un eje normal que pase por el punto de incidencia, dicha luz se extingue.

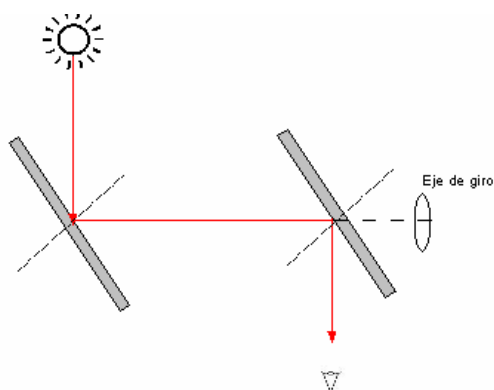


fig . 3.62

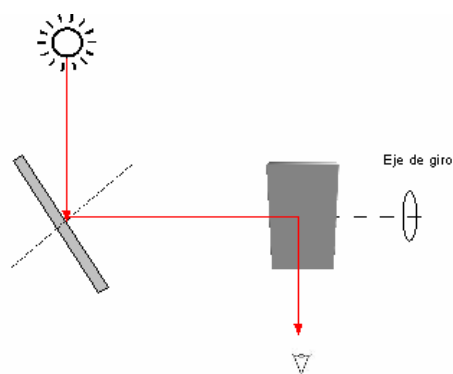


fig . 3.63

La conclusión a la que llegó, es que bajo un ángulo de incidencia determinado ($56,7^\circ$ para el aire – vidrio), el rayo reflejado adquiere o filtra una nueva propiedad asimétrica que llamó *polarización*.

Su explicación recuerda a las oscuras propiedades que asignaba Newton a las partículas de luz. Basándose también en un modelo longitudinal, adjudicaba a cada partícula tres ejes perpendiculares entre sí : *a* en la dirección del rayo, *b* paralelo al espejo desde el que el rayo se refleja según el ángulo de polarización, y *c* perpendicular a ambos. Si el rayo llega a un segundo espejo cruzado 90°, bajo un ángulo igual, el eje *c* estaría en el plano del segundo espejo, pero si no puede ser reflejada luz desde el primer espejo con su eje *c* paralelo al espejo, ocurriría lo mismo para la segunda reflexión, lo que explicaría la extinción referida.

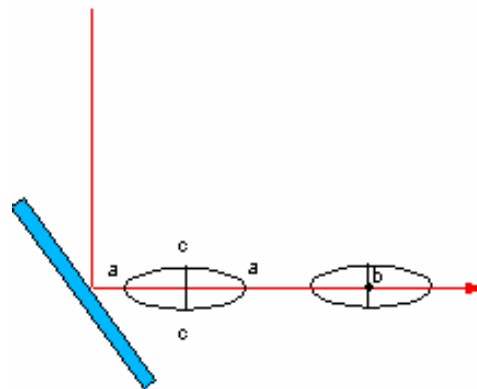


fig . 3.64

Su conocida ley enuncia que si la luz procedente de la reflexión consecutiva de dos espejos que forman entre sí un ángulo ϕ , la intensidad final respecto la del rayo que llega al primer espejo, estará en la relación:

$$\cos^2 \phi: 1$$

Poco después comprobará que se cumple la misma ley para rayos que emergen de secciones principales de calcita que formen el mismo ángulo. Pero Malus también percibe que además de la luz reflejada hay trazas de polarización en los rayos refractados.

En 1815 el escocés, Sir David Brewster (1781-1868), famoso por su invención del caleidoscopio y del estereoscopio de lentes, concibe que la luz natural que llega a una superficie reflectante no metálica, se puede componer como la suma de otras dos plano-polarizadas, de modo que el efecto de la calcita es su separación. Su mayor contribución a la óptica fue conseguir relacionar el ángulo de polarización con el índice de refracción del medio.

En efecto, comprobó experimentalmente que cuando la luz incidente lo hace según el ángulo de Malus, los rayos reflejado y refractado forman entre sí un ángulo de 90°. Merece destacarse que tanto Malus como Brewster a pesar de que manejaban un modelo longitudinal de la luz, sus leyes permanecen vigentes, puesto que sólo establecen hechos experimentales.

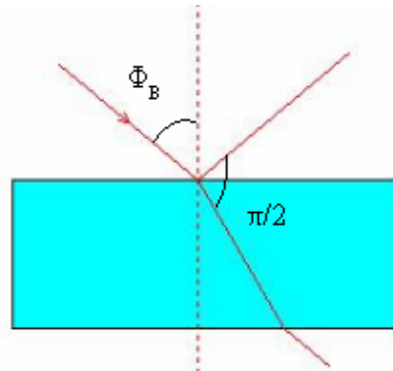


fig . 3.65

Como r y r' son ángulos complementarios, $\sin r = \cos r'$, y como según Snell,

$$\sin r = n \sin r' = n \cos r$$

se deduce que:

$$n = \tan r$$

Si bien esta expresión es más bien un resultado que una predicción, la relación entre el índice y el ángulo, explica que al ser la luz blanca una mezcla de varios colores, el ángulo dependerá de la longitud de onda incidente, lo que explica que la extinción no sea total para esta luz. Al igual que Malus, Brewster pensaba imposible la explicación del fenómeno por una onda longitudinal. Como veremos, fue necesaria la gran síntesis del electromagnetismo para la justificación de esta ley. Es el campo eléctrico incidente, el que induce dipolos oscilantes que al no poder irradiar en la dirección de oscilación, justifican que no se produzca la onda reflejada bajo el ángulo citado.

La reconstrucción mental del experimento, difícil por el esfuerzo que supone la representación espacial de planos perpendiculares, se simplifica con la maqueta que describe el científico e historiador de la ciencia Ernst Mach (1926) y reproduce en mi centro: si se construyen dos prismas cuyas bases son triángulos rectángulos y se pegan en la cara lateral más extensa dos vidrios con la base posterior pintada en negro, y se hace incidir un haz de luz sobre el primer prisma según el ángulo referido, se observa ya una disminución apreciable de la intensidad reflejada. Si a continuación se coloca el segundo espejo, girándolo 90° respecto del eje que pasa por el rayo incidente, los rayos que llegan hasta él lo hacen según el mismo ángulo, pero el plano de incidencia se ha girado un ángulo recto. En estas condiciones se observa la extinción completa del haz reflejado.



fig . 3.66

La Polarización especular a la luz de las ondas transversales

El descubrimiento de la naturaleza transversal del vector luminoso descubierta por Fresnel y Young ,aclara también el proceso físico de la transmisión y la reflexión cuando la incidencia se hace sobre un dieléctrico transparente como el vidrio según el ángulo de Brewster.

Tanto Malus como Brewster habían descubierto que cuando el rayo incidente cumplía la citada condición, la luz reflejada era totalmente polarizada en un plano perpendicular al de incidencia, y la transmitida lo era parcialmente en el plano de incidencia. Brewster añadió la observación de que el rayo reflejado y el transmitido eran perpendiculares, pero el motivo por el que esto ocurría, les resultaba inexplicable desde su modelo de transmisión en corpúsculos dotados de extrañas propiedades y un éter con ondas longitudinales. Sin embargo, el vector luminoso podía explicar la vibración paralela de las partículas del medio (hoy sabemos que son los electrones del medio los que oscilan al modo de una antena que, como todas, no puede radiar energía en la dirección del dipolo).

A efectos de analizar mejor el problema, veamos lo que ocurre en los casos de incidencia paralela al plano de incidencia de un lado y en el de incidencia normal a dicho plano en otro.

En el primero, la onda incidente obliga a vibrar a los electrones del medio sobre el plano de incidencia, en la dirección del vector incidente. Dada la naturaleza transversal de ésta, es imposible que emita energía en la dirección longitudinal de vibración. El resultado de la reirradiación de estos electrones da lugar a una onda transmitida (refractada) y otra reflejada. En el caso de que ambas sean perpendiculares, dada la reversibilidad del haz, si se observa la reflejada desde el rayo refractado, el reflejado tiene prohibidas las paralelas al plano de incidencia, al igual que una antena de un transmisor nunca radia o recoge energía en el sentido de las barras emisoras de la señal.

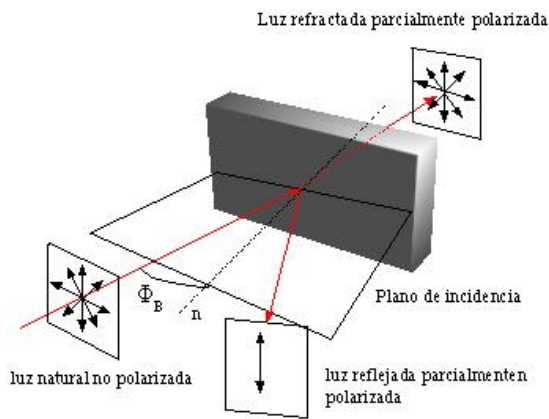


fig . 3.67

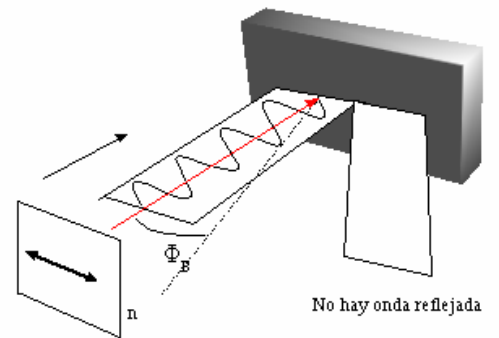


fig. 3.68

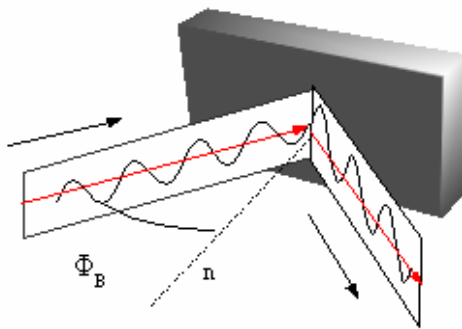


fig . 3.69

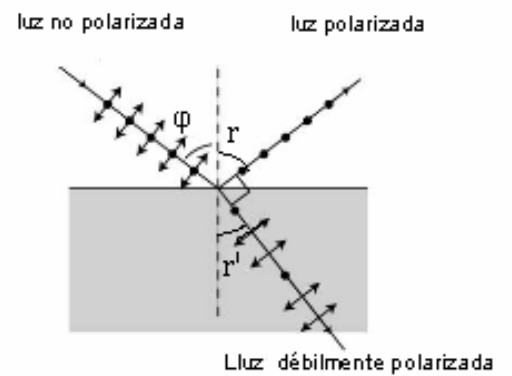


fig . 3.70

Una explicación muy intuitiva es que para un observador interior al vidrio, los electrones que vibran no pueden irradiar energía (como cualquier antena) en la dirección perpendicular a la vibración. En nuestro caso, cuando el rayo reflejado y refractado son perpendiculares, se elimina la componente paralela al plano de incidencia del rayo reflejado.

Otras formas de polarización

Durante las décadas de 1810 a 1830, los avances sobre este tema, fueron paralelos a la difracción. El prisma de Nicol, obtenido en 1828 tras cortar dos trozos de Espato de Islandia y vueltos a pegar tras pulir convenientemente la nueva sección y pintarla con Bálsamo del Canadá a fin de eliminar el rayo ordinario, fue durante tiempo el mejor sistema de conseguir luz polarizada. Brewster descubrió un tercer método para la obtención de luz polarizada haciendo pasar luz a través de una lámina de ágata que absorbe una de las componentes y deja pasar sólo la otra. Simultáneamente, Biot y Seebeck consiguieron lo mismo con una delgada lámina de turmalina, aunque no fue un método eficaz debido a la tonalidad verdosa de la luz emergente y a la poca intensidad del haz conseguido.

En 1811, Arago descubrió la polarización cromática interponiendo una delgada lámina de mica entre la luz reflejada por un vidrio y un espato de Islandia que hacía las veces de analizador. Cuál no sería su sorpresa al comprobar que a medida que se giraba la lámina aparecían sucesivamente intensos colores!. Posteriormente percibió que sucede lo mismo si eliminaba el vidrio y enfocaba el rayo visual directamente el Espato de Islandia hacia el cielo interponiendo la lámina de mica. El año siguiente, su amigo Biot presentó un informe mucho más claro sobre el mismo tema, lo que supuso un alejamiento definitivo entre ambos científicos.

La intuición de las ondas transversales

La colaboración conjunta de Arago y Fresnel en 1816 en este tema supuso la base experimental para la propuesta que Young hizo sobre la posible naturaleza transversal de las ondas de luz y para la completa teoría que Fresnel hace de la birrefringencia cinco años más tarde. Aunque en realidad fueron más experiencias, el resumen de las mismas en el que se manejan un foco luminoso, un diafragma, una lámina de mica, una doble rendija, tres polarizadores y una pantalla, es suficiente para la comprensión del fenómeno (Ditchburn, 1961):

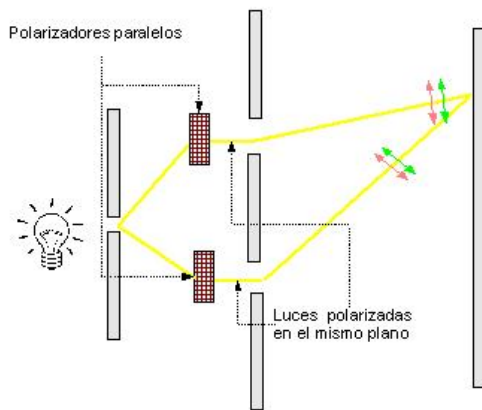


fig . 3.71

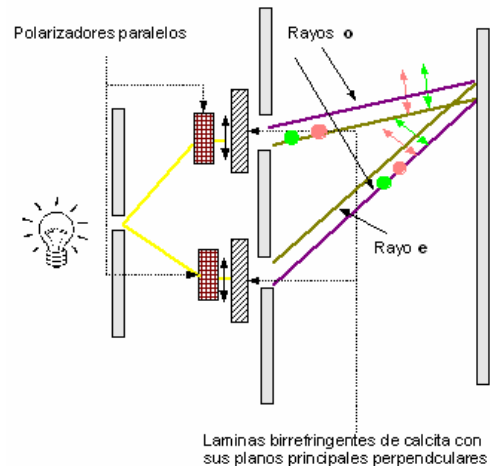


fig . 3.72

- a) Si en el montaje adjunto, se mantienen el P_A y P_B con sus ejes paralelos, se obtienen franjas de interferencia iguales a las obtenidas con luz no polarizada, pero si se disponen con sus ejes perpendiculares, no se obtiene interferencia alguna.
- b) Manteniendo el montaje anterior, si se introducen dos láminas birrefringentes perpendiculares entre sí antes de cada una de las dos rendijas, se obtienen dos grupos de franjas de interferencias levemente desplazadas entre sí. Cada una de ellas es el resultado de los vectores paralelos de los rayos ordinario y extraordinario, que al ser coherentes mantienen la interferencia.
- c) No sucede lo mismo si tras la fuente no polarizada, situamos los polarizadores en posiciones perpendiculares. A su salida tenemos ahora dos rayos con polarización lineal perpendiculares entre sí, con la particularidad de que al provenir de trenes distintos, son totalmente incoherentes. Si a continuación se sitúa una lámina de cristal birrefringente formando un ángulo de $\pi/4$ los dos rayos, se transforman en dos pares de rayos con sendas polarizaciones respectivas perpendiculares entre sí. Parece que en cada par, al tener vectores paralelos deberían darse interferencias, pero la realidad es que al venir ya incoherentes de origen no se da esta situación.

Tras ellas, concluyen los siguientes puntos (Mach, 1926)

1. Bajo las condiciones en que dos rayos de luz ordinaria, exhiben interferencia destructiva, dos rayos de luz polarizada en planos perpendiculares, no indican ninguna clase de interacción.
2. los rayos polarizados en el mismo plano interfieren como los rayos no polarizados, siendo el efecto idéntico en ambos casos.
3. Rayos polarizados en planos perpendiculares y llevados al mismo plano de interferencia, interfieren como los no polarizados si se originan en el mismo haz polarizado.
4. Rayos plano-polarizados procedentes de componentes perpendiculares de una luz no polarizada, y rotados después hacia el mismo plano, no producen ninguna interferencia.

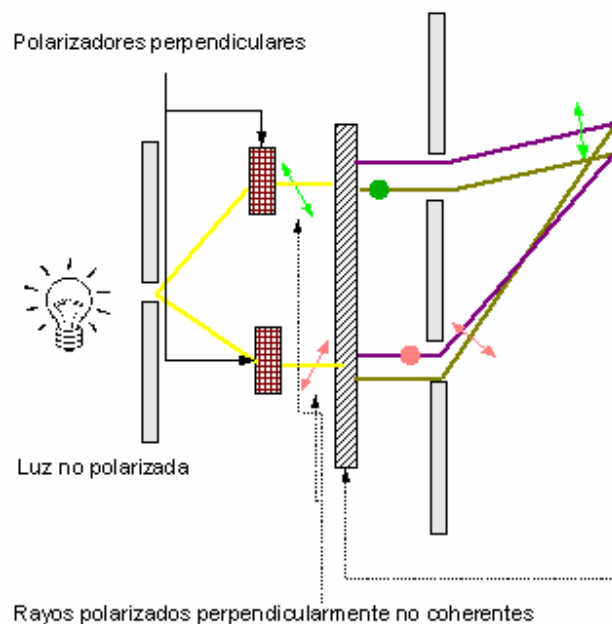


fig . 3..73

Las experiencias sobre polarización cromática, de Brewster, Arago y Fresnel (1816) , permitieron a Young intuir la posible existencia de una componente transversal de las ondas de luz, como expresa en su famoso artículo en la Británica y en una carta a Arago (Halliday, 2001)

- *He estado reflexionando sobre la posibilidad de dar una explicación imperfecta de la cualidad de la luz que constituye la polarización sin alejarme de la doctrina auténtica de las ondulaciones. Es un principio de esta teoría que todas las ondulaciones se propagan simplemente a través de los medios homogéneos en superficies esféricas concéntricas como las ondas del sonido, consistiendo simplemente en los movimientos directo y retrógrado de las partículas en la dirección del radio con sus condensaciones y rarefacciones concomitantes. Pues bien, es posible explicar en esta teoría una vibración transversal, propagada también en la dirección del*

radio, y con igual velocidad, estando los movimientos de las partículas en una cierta dirección constante con respecto a ese radio, y esto es una polarización (Young, 1817).

Poco después Fresnel también comienza a acariciar la idea pero de modo más reservado, pues ello supondría un cambio radical en su concepción del éter (Cantor, 1918), que en su modelo, vibraba longitudinalmente de igual manera que el aire al llevar las ondas sonoras. Ciertamente es que de admitir dicha naturaleza, las dificultades matemáticas se reducían de modo drástico, pero admitirlas suponía que el éter soporte de las perturbaciones, debería ser un sólido, viscoso, además de elástico, para recuperar las posiciones iniciales, tras el paso de la onda, mientras que el movimiento de los planetas se aceptaba que transcurría en medio muy liviano capaz de introducirse en todos los poros de la materia. Tan fuerte era esta apuesta, que su amigo y colaborador, Arago decidió desmarcarse del nuevo rumbo que imponía Fresnel.

En su *‘Mémoire sur la Double Refraction’* publicada en 1821 (recogida tras su muerte con más escritos en sus *Obras Completas* por su hermana Leonor y su discípulo Verdet) relata su propio proceso al respecto, en lo que para mí es un ejemplo histórico de cómo se gesta un nuevo paradigma:

...Cuando mi amigo, Arago y yo nos hubimos dado cuenta de que los rayos polarizados perpendicularmente, producen siempre la misma cantidad de luz tras su reunión, cualquiera que sea su diferencia de camino, yo pensé que se podía explicar fácilmente esta ley particular de la interferencia de los rayos polarizados, suponiendo que las vibraciones luminosas, en lugar de empujar a las moléculas etéreas paralelamente a los rayos, las hacían oscilar en direcciones perpendiculares, y que esas direcciones se encontraban perpendiculares en dos rayos polarizados según un ángulo recto. Pero esta suposición era tan contraria a la naturaleza de las ideas recibidas sobre las vibraciones de los fluidos elásticos, que tardé mucho antes de adoptarla totalmente. Incluso aunque el conjunto de los hechos y nuevas reflexiones me habían persuadido de que era necesario para la explicación de los fenómenos de óptica, esperé, antes de someterla al examen de los físicos, a asegurarme que no era contraria a los principios de la mecánica. El señor, Young, más atrevido en sus conjeturas, y menos confiado en la visión de los geómetras, la ha publicado antes que yo, aunque la pueda haber pensado más tarde, y por tanto le pertenece la prioridad de esta idea teórica así como la de tantas otras. Son las experiencias del doctor Brewster con cristales de dos ejes, las que le han llevado a pensar, que las vibraciones de la luz, en lugar de ejecutarse longitudinalmente en la dirección de los rayos, bien podrían ser transversales y semejantes a las ondulaciones de una cuerda indefinida agitada por uno de sus extremos. Fue con ocasión de las observaciones del señor Brewster cuando él publicó esta hipótesis, es decir, tres años después del descubrimiento de las características particulares de la interferencia de los rayos polarizados...

Lorsque nous eûmes remarqué, M. Arago et moi, que les rayons polarisés à angle droit produisent toujours la même quantité de lumière par leur réunion, quelle que soit leur différence de marche^(a), je pensai qu'on pouvait expliquer aisément cette loi particulière de l'interférence des rayons polarisés, en supposant que les vibrations lumineuses, au lieu de pousser les molécules éthérées parallèlement aux rayons, les faisaient osciller dans des directions perpendiculaires, et que ces directions se trouvaient rectangulaires pour deux faisceaux polarisés à angle droit. Mais cette supposition était si contraire aux idées reçues sur la nature des vibrations des fluides élastiques, que je fus longtemps avant de l'adopter entièrement; et lors même que l'ensemble des faits et de nouvelles réflexions m'eurent persuadé qu'elle était nécessaire à l'explication des phénomènes de l'optique, j'attendis avant de la soumettre à l'examen des physiciens, que je me fusse assuré qu'elle n'était point contraire aux principes de la mécanique. M. Young,

plus hardi dans ses conjectures, et moins confiant dans les vues des géomètres, l'a publiée avant moi (quoiqu'il y ait peut-être pensé plus tard)^(b), et par conséquent la priorité lui appartient sur cette idée théorique comme sur beaucoup d'autres. Ce sont les expériences du docteur Brewster sur les cristaux à deux axes qui l'ont conduit à penser que les vibrations de la lumière, au lieu de s'exécuter longitudinalement, dans la direction des rayons, pourraient bien être transversales, et semblables aux ondulations d'une corde indéfinie qu'on agiterait par une de ses extrémités; c'est du moins à l'occasion des observations de M. Brewster qu'il a publié cette hypothèse, c'est-à-dire trois ans après la découverte des caractères particuliers de l'interférence des rayons polarisés. En m'appuyant sur la première loi de leur action mutuelle, je vais essayer de prouver que les vibrations lumineuses

En su tratado sobre la birrefringencia (Fresnel, 1866), define un vector luminoso perpendicular al frente de la onda luminosa, de amplitud senoidal, que puede o no, vibrar en un plano uniforme. El significado físico de este vector, lejos aún de la interpretación de Maxwell como un campo eléctrico senoidal, sería el de una vibración transversal del éter sólido, elástico y liviano que transmitiría las vibraciones de las partículas atómicas. En la luz natural coexistirían infinitud de planos de vibración, procedentes de la infinitud de osciladores existentes en un foco luminoso, y una luz polarizada es el resultado de seleccionar solo uno de entre estos planos. Es de destacar que aunque poco después la teoría Electromagnética da un significado mucho más profundo a estas ondas, su vector de luz se corresponde perfectamente con el vector eléctrico E que aparece en ellas, lo que permite la vigencia de sus desarrollos matemáticos tanto para difracción como para la amplitud de las ondas reflejada y transmitida en dos medios distintos, y para el complejo estudio de la luz polarizada y de la birrefringencia. Es por ello, por lo que a efectos didácticos, en los desarrollos que expondremos para explicar las bases de la polarización, haré un salto de cincuenta años en el tiempo, incluyendo el vector E de Maxwell en los desarrollos de Fresnel sobre estos tópicos.

A diferencia de Newton, la muerte de Fresnel dejó un nutrido grupo de investigadores como Cauchy, Fraunhofer, Verdet (1869), Billet, Fizeau, Foucault, que continuaron ampliando la visión de la difracción y la birrefringencia así como el cálculo de la velocidad de la luz en distintos medios. Un estudio detallado del desarrollo histórico de estos temas está fuera de las intenciones de este escrito, dado que nuestro propósito sólo es el desbroce de los conceptos ópticos para lectores con intereses culturales no iniciados aún en la especialización. Existen además suficientes recursos eruditos en textos, como en el nuevo recurso de la Web para profundizar en él.

Relaciones entre MAS y polarización

El hecho de asumir la transversalidad de las ondas luminosas, supuso un modelo tan coherente para la luz, que los problemas que suscitaban fenómenos tan difíciles como la polarización cromática, quedaban prácticamente resueltos. A partir de ese momento con unas sencillas matemáticas y con el postulado de la coherencia de las ondas, fue posible explicar la mayoría de los fenómenos ondulatorios de la luz.

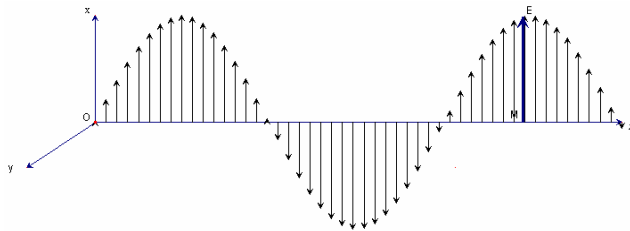


fig . 3.74

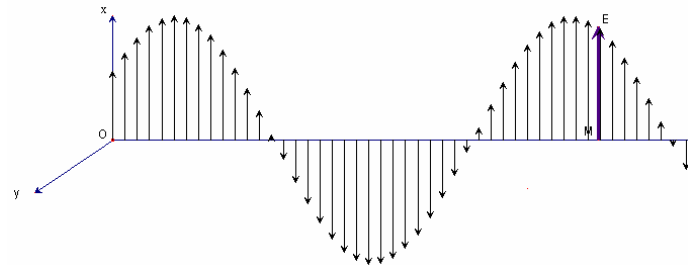


fig . 3.75

La propagación de las ondas esféricas se puede interpretar a distancias grandes del foco emisor, como un tren de ondas planas, fruto de las vibraciones de la infinidad de átomos que emiten ondas con azimut aleatorios, cuya sección por un plano paralelo a la dirección de propagación, sería una senoide. El vector luminoso de cada átomo, vibraría en un plano, cambiando en el tiempo y el espacio periódicamente del mismo modo que las ondas mecánicas que viajan en el agua al caer en ella una piedra. Un haz de luz natural está formado por una infinidad de rayos como el anterior, vibrando cada uno en un plano según una orientación distinta.

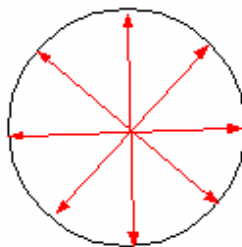


fig . 3.76

Aún hoy día, la comprensión cualitativa del fenómeno necesita de cierto detenimiento. A fin de facilitarla, es útil refrescar que la vibración del extremo del vector luminoso se puede relacionar

con el símil mecánico de una masa que oscila en direcciones perpendiculares al ser solicitada por dos resortes idénticos. Una rápida perspectiva nos ayudará.

Polarización lineal

Si la fase inicial de ambos es nula, lo que sucede cuando el estado de vibración de ambos está en la posición de equilibrio, las distancias vertical y horizontal a los ejes coinciden en todo momento y el móvil describe una línea recta en el plano (x,y) .

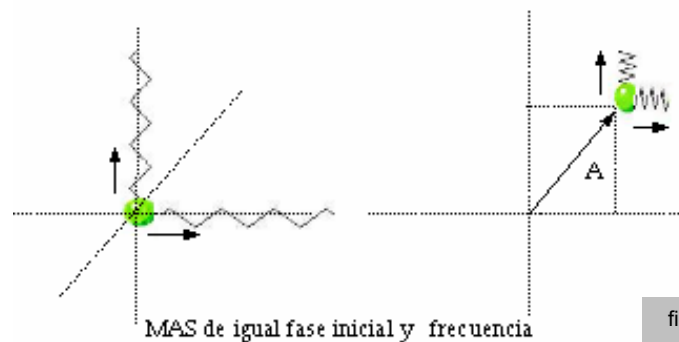


fig . 3.77

$$x = A \sin \omega t \quad y = A \sin \omega t \quad Q \ x/y = 1 \quad \text{luego}$$

$$y = x$$

Que es la ecuación de la recta bisectriz del primer cuadrante.

Una onda que se puede componer como otras dos perpendiculares de igual fase y frecuencia, dará el resultado de otra cuyo vector luminoso estará en una recta bisectriz del plano perpendicular a la dirección de transmisión

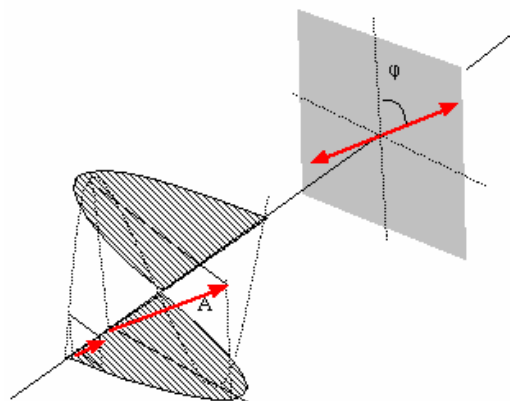


fig . 3.78

Polarización circular

No siempre las fases iniciales coinciden. Si una de las vibraciones se inicia cuando la otra está en su máximo alejamiento de la posición de equilibrio, el desfase de ambas es $\pi/2$, y el punto describe una circunferencia.

Si nos referimos a la figura:

$$x = A \sin \omega t \qquad y = A \sin (\omega t + \varphi) = A \cos \omega t$$

Elevando ambas ecuaciones al cuadrado y sumándolas:

$$x^2/A^2 + y^2/A^2 = \sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1$$

Que es una circunferencia de radio A

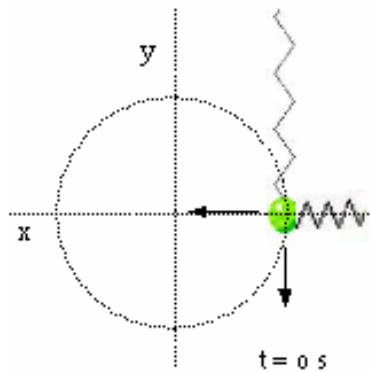


fig . 3.79

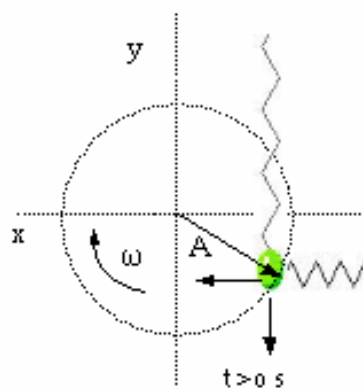


fig . 3.80

lo que daba lugar a las conocidas gráficas de Lissajous

En el caso de dos ondas de igual amplitud, perpendiculares entre sí y desfasadas 90° , que viajan en la misma dirección, un observador enfrenteado a dicha dirección, vería que del vector luminoso, a la vez que se desplaza la dirección de la onda, en gira en sentido contrario a las agujas del reloj (respecto a él en este caso).

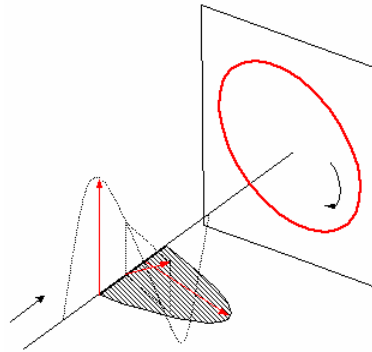


fig . 3.81

Si las amplitudes fueran distintas y los desfases arbitrarios, tendríamos una elipse en el caso más general.

Polarizadores y analizadores

Ya hemos visto que existen materiales como el espato de Islandia o la turmalina que pueden polarizar la luz, o lo que es igual, seleccionar sólo uno de los planos de vibración que constituyen un haz de luz natural según la dirección de polarización propia. Como consecuencia de ello, un haz incidente con un azimut distinto, será transmitido sólo con su componente paralela a dicha dirección en el filtro polarizador. Si el haz de luz viene sin polarizar, este dispositivo, dejará pasar sólo las componentes paralelas a esta dirección.

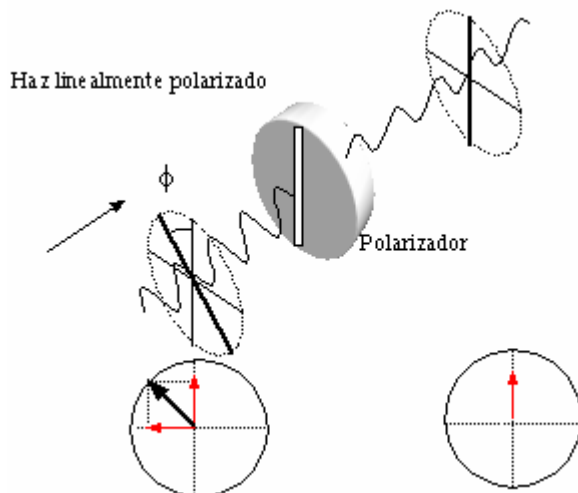


fig . 3.82

Ahora es sencillo entender la ley de Malus, puesto que la componente útil de la amplitud que atraviesa el polarizador es la paralela a éste de valor $A \cos \Phi$ y puesto que la intensidad de una onda es proporcional al cuadrado de su amplitud, nos queda para ésta el conocido valor

$$I = A^2 \cos^2 \Phi$$

Es evidente que la intensidad de la luz polarizada va disminuyendo según aumenta el ángulo entre la dirección de transmisión y el vector luminoso. Esta propiedad la utiliza una conocida marca comercial de gafas de sol con cristales polarizados para filtrar de la luz natural solamente las componentes paralelas a la referida dirección.

Si al montaje anterior se le añade un segundo polarizador que comúnmente se llama *analizador*, podemos rotarlo y variar con ello su dirección de transmisión. Si lo disponemos con el eje perpendicular al polarizador inicial, habrá extinción completa del haz transmitido.

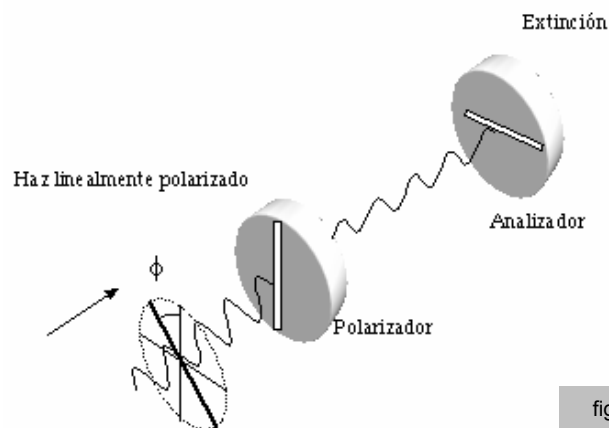


fig . 3.83

Colores inducidos por láminas birrefringentes

Bastante antes de conocer la naturaleza electromagnética de sus ondas, la teoría de Fresnel fue capaz de explicar incluso los sorprendentes colores que aparecen cuando se intercala láminas de mica o celofán entre dos polarizadores cuyos ejes están cruzados. Las láminas de mica son birrefringentes con su eje óptico situado en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda, y en esta situación, si el rayo incide con su vector luminoso según un azimut de por ejemplo 45° , se descompone en uno extraordinario (más rápido) y otro ordinario (más lento) en planos de polarización perpendiculares. Según el espesor e de esta lámina se consigue que al viajar ambos a distinta velocidad, los caminos ópticos respectivos sean $(n_E e - n_O e)$ y ello origina desfases entre ambas ondas de valor $2\pi (n_E e - n_O e)/\lambda$, que a modo de ejemplo, hemos concretado en el

dibujo en media onda .A la salida del cristal ambas ondas viajan a igual velocidad ya desfasadas y su composición resultante, será otra cuyo azimut estará rotado a izquierdas respecto al anterior en 90° .

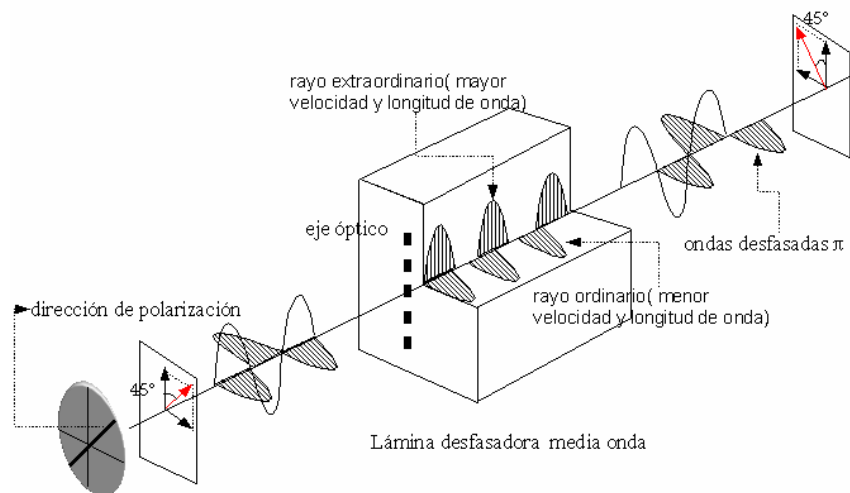


fig . 3.84

Si esta onda llega a un segundo polarizador (analizador) con su dirección paralela al haz transformado, ésta pasará íntegramente, y de no ser así sólo lo hará la componente paralela a dicha dirección.

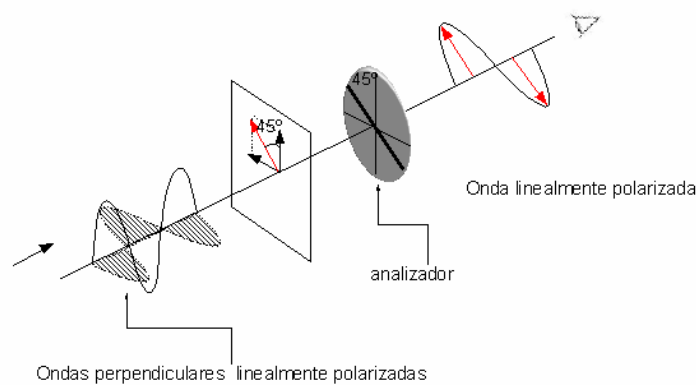


fig . 3.85

Más interesante es el caso en que la lámina produce desfases de media onda ($\Delta\phi = \pi/2$) entre el rayo ordinario y el extraordinario. En estas condiciones se produce una polarización circular, y si a continuación se coloca el analizador, la onda resultante no podrá atravesarlo.

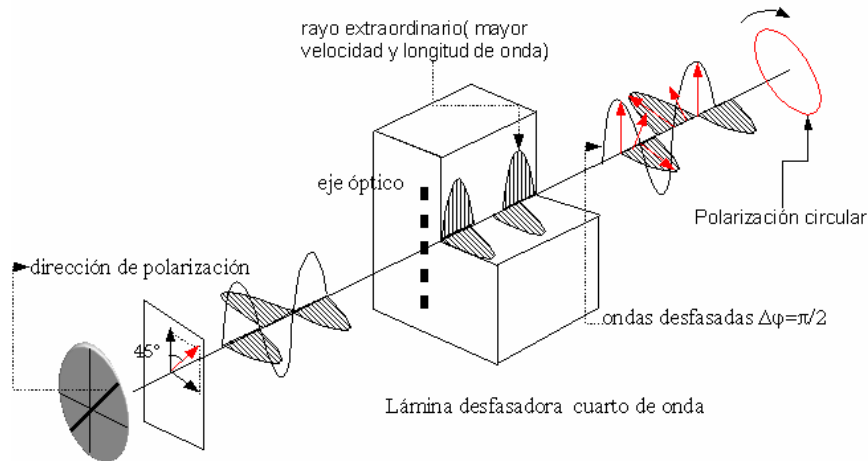


fig . 3.86

A la salida del segundo polarizador, sólo las componentes de ambas ondas paralelas a su dirección de transmisión, lo atravesarán polarizadas en el mismo plano con un desfase de $\Delta\phi = \pi/2$, y podrán interferir. Las componentes perpendiculares no producen interferencias, pues la acción en cierto eje no podrá ser reforzada ni inhibida por lo que afecte a la dirección perpendicular, aunque sí pueda dar una acción simultánea.

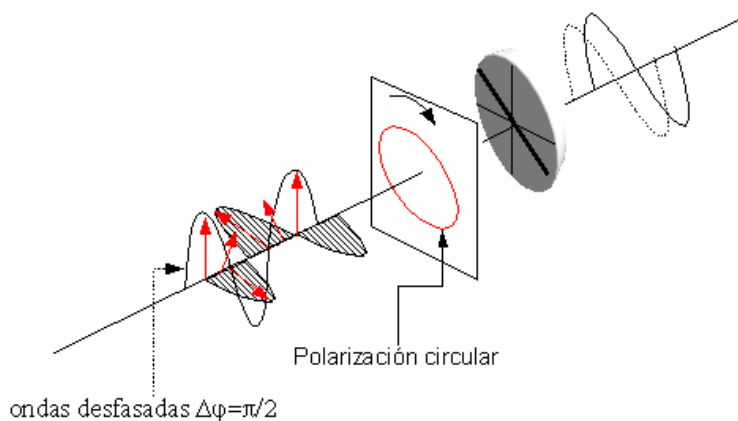


fig . 3.87

Finalmente, cuando el desfase inducido por la lámina es arbitrario, las ondas ordinaria y extraordinaria tendrán a su salida una diferencia de fase que ya no es múltiplo de ninguna cantidad conocida. Su composición a la salida de la lámina será una *onda elíptica*, con el vector luminoso girando en cada instante en el plano perpendicular a la dirección de la onda. Al incidir sobre el segundo polarizador (analizador), sólo las componentes de ambas paralelas a su dirección de transmisión lo atraviesan y tienen capacidad de interferir.

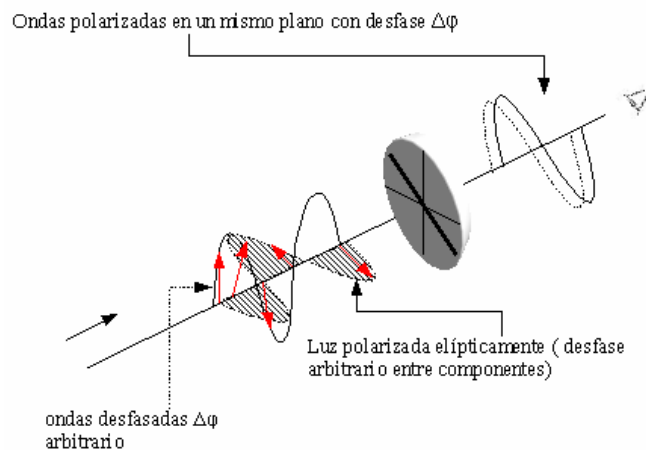


fig . 3.88

Ya estamos en condiciones de dar una explicación plausible del conocido fenómeno que se produce al intercalar una lámina de celofán entre dos polarizadores cruzados que cerraban totalmente el paso de luz blanca en virtud del cual aparecen una serie de colores que van cambiando a medida que se gira la lámina.

Si el espesor de la lámina es, por ejemplo, el adecuado para que el color amarillo salga del cristal polarizado linealmente, los demás colores lo harán en general elípticamente, con desfases por encima y debajo de cero. En nuestro caso, el amarillo saldrá con intensidad máxima, y el color azul, complementario del amarillo, estaría filtrado. Si a continuación se gira el analizador, los colores van cambiando hasta la extinción del amarillo y la aparición del azul, amén de los colores intermedios.

Las aplicaciones que los geólogos hacen de esta propiedad en la observación de los colores que aparecen al colocar estrechas láminas de minerales entre dos polarizadores cruzados para la identificación de minerales, o el análisis de esfuerzos de modelos de metacrilato a través de los colores que dicha pieza induce cuando se la deforma entre dos polarizadores cruzados, son sólo dos de la infinidad de ejemplos.

5.3.4 La síntesis electromagnética

Mientras que los continuadores de Fresnel seguían trabajando con la hipótesis de un éter que soportase los fenómenos ópticos, dotado de las propiedades elásticas de los fluidos y sólidos, la aparición de los fenómenos eléctricos y magnéticos sugirió para otros como Euler y Franklin una concepción más amplia del mismo que abarcase también los fenómenos eléctricos.

Las líneas de fuerza de Faraday

Michael Faraday (1791-1867) el mejor físico experimental de la historia, intentaba que sus líneas de fuerza eléctricas y magnéticas fueron no sólo representaciones abstractas, sino también deformaciones del éter real inducidas por la aparición de imanes y cargas. Enemigo de las acciones a distancia de Newton, entendía el éter como el medio por el que viajaban las fuerzas gravitatorias y eléctricas. Su afán de descubrir nuevas relaciones entre parcelas aparentemente desconexas, le llevó a demostrar la relación entre corrientes y campos magnéticos variables, pero también a demostrar la existencia de interacciones entre la luz y campos magnéticos. Su ya clásica experiencia en los cursos universitarios de óptica física, data de 1845 con un montaje en el que hacía pasar la luz polarizada procedente de un espejo, a través de un electroimán desconectado y de un prisma de Nicol que había sido girado hasta conseguir la extinción del haz de luz. En el momento de conectar el electroimán, la luz apareció de nuevo, lo que sólo se podía interpretar aceptando que el plano de polarización de una luz, giraba en las proximidades de un campo magnético.

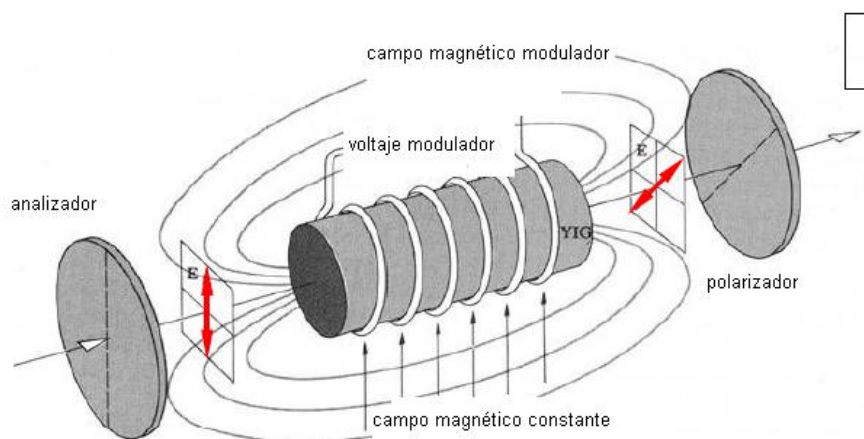
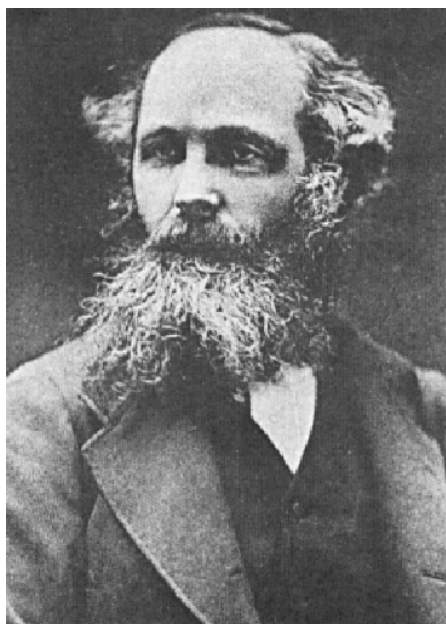


fig .3.89 Rotación del plano de polarización de la luz en un campo magnético

CHAPTER XX.

ELECTROMAGNETIC THEORY OF LIGHT.



781.] In several parts of this treatise an attempt has been made to explain electromagnetic phenomena by means of mechanical action transmitted from one body to another by means of a medium occupying the space between them. The undulatory theory of light also assumes the existence of a medium. We have now to shew that the properties of the electromagnetic medium are identical with those of the luminiferous medium.

To fill all space with a new medium whenever any new phenomenon is to be explained is by no means philosophical, but if the study of two different branches of science has independently suggested the idea of a medium, and if the properties which must be attributed to the medium in order to account for electromagnetic phenomena are of the same kind as those which we attribute to the luminiferous medium in order to account for the phenomena of light, the evidence for the physical existence of the medium will be considerably strengthened.

But the properties of bodies are capable of quantitative measurement. We therefore obtain the numerical value of some property of the medium, such as the velocity with which a disturbance is propagated through it, which can be calculated from electromagnetic experiments, and also observed directly in the case of light. If it should be found that the velocity of propagation of electromagnetic disturbances is the same as the velocity of light, and this not only in air, but in other transparent media, we shall have strong reasons for believing that light is an electromagnetic phenomenon, and the combination of the optical with the electrical evidence will produce a conviction of the reality of the medium similar to that which we obtain, in the case of other kinds of matter, from the combined evidence of the senses.

James Clerk Maxwell (1831-1879), uno de los cinco grandes físicos de la Historia, escribió en 1873 su célebre texto '*A treatise on electricity and magnetism*', el broche de la que se consideraría la teoría definitiva de la luz con la creación del Electromagnetismo. Recoge en ella la hipótesis de Faraday de un éter soporte de las líneas de fuerza y elástico, para justificar la velocidad finita de la luz y de la inducción magnética.

Tras un estudio de los sólidos elásticos y de la hidrodinámica en fluidos, intentó un símil mecánico del electromagnetismo con la analogía de comparar el éter con un fluido móvil dotado de un movimiento de vórtices moleculares que giran alrededor de las líneas de fuerza. Entre los vórtices habría delgadas bolas, las cargas eléctricas, girando en dirección opuesta, que darían como resultado el movimiento continuo de dichos vórtices en situación estacionaria sin pérdidas de energía. Cuando se establece una corriente, este equilibrio desaparece: vórtices contiguos girando a velocidad distinta, provocan fuerzas tangenciales sobre las bolitas de carga fronterizas, y en el proceso, las partículas deben pasar de un vórtice a otro a lo largo de las líneas de corriente a otro con una energía suplementaria que perderán en forma de calor (Berkson, 1974)

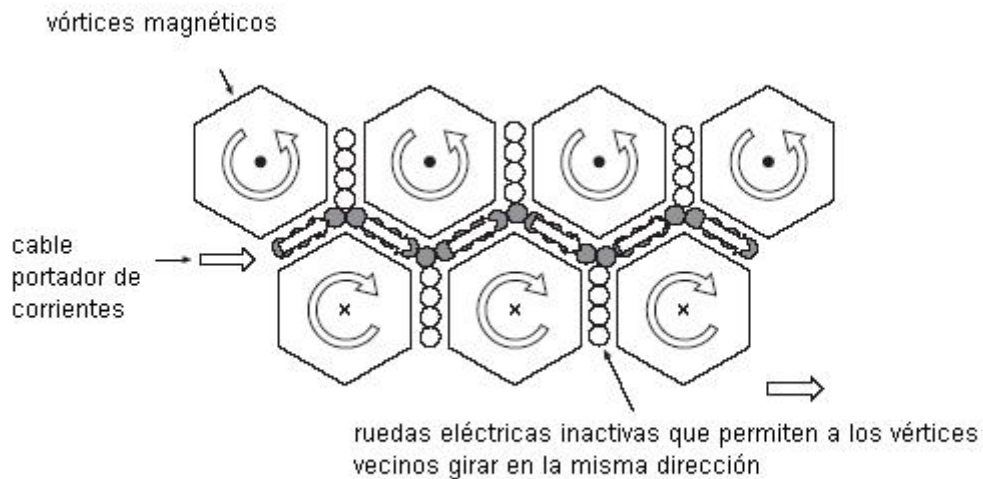


fig. 3.90 Vórtices del éter de Maxwell

Otra suposición de su modelo era que las bolas responsables de la acción eléctrica, deberían tener masa y elasticidad, lo que explicaría la propagación finita de las fuerzas eléctricas a través del medio y de la inducción magnética.

Tras un desarrollo de los tópicos del electromagnetismo que aún siguen teniendo vigencia, y una síntesis de los mismos en sus cuatro conocidas *ecuaciones*, “*dignas de un Dios*” según un contemporáneo, postuló la existencia de unas corrientes de desplazamiento que viajaban por el aire de las que se deduce un transporte de energía por el aire en forma ondulatoria. Un cálculo de la velocidad de esas ondas, le llevó al reciente valor de la velocidad de la luz medido por Fizeau y Foucault poco antes. Su ecuación será idéntica a la de una onda mecánica con la salvedad de que los vectores a considerar serán ahora el campo eléctrico **E** y la inducción magnética **B**.

$$E = E_0 \text{ sen } (\omega t - kx)$$

$$B = B_0 \text{ sen } (\omega t - kx)$$

Hasta qué punto se tomó en serio Maxwell su modelo mecánico de los vórtices, es aún hoy una incógnita, pues en repetidas ocasiones lo refiere sólo como una suposición a pesar del esfuerzo que dedicó a su descripción. Lo cierto es que sus ecuaciones se sustentan sin necesidad de ningún éter.

Las ondas Hertzianas del físico experimental

En 1886, el joven profesor alemán Heinrich Hertz tras un brillante doctorado dirigido por Helmholtz, ingresó como profesor en la Universidad de Karlsruhe e inició allí el diseño de un Experimentum Crucis para crear las ondas cuya existencia había predicho Maxwell. Durante la fase previa, descubrió en 1887 el efecto fotoeléctrico en las descargas eléctricas de alta tensión que provocaba entre esferas metálicas en el aire. Para la experiencia aplicó un carrete de Rhumkford (de análogo funcionamiento a las actuales bobinas que alimentan las bujías de los automóviles) como generador de corrientes alternas de alto voltaje adosado a la salida de alta tensión a dos parejas de bolas metálicas cuya función era la de un condensador que conseguía la frecuencia de resonancia de la oscilación en el secundario. Recordemos que el carrete consta de dos bobinas, una de pocos hilos que se acopla a una corriente continua de 12 voltios que un interruptor elástico accionado intermitente por la bobina primaria y otra secundaria de muchas vueltas en la que se generan corrientes alternas de alto voltaje por las interrupciones del flujo magnético que la atraviesa subsiguientes a las brevísimas interrupciones y conexiones que el interruptor citado genera en el circuito primario. Un condensador en paralelo en el primer circuito tiene la función de homogeneizar las descargas en ambos sentidos. Los altos voltajes en el secundario conseguían descargas entre dos pequeñas esferas metálicas conectadas a su vez a dos gruesas masas de cobre que hacían las veces de condensador. Además del emisor, utilizó como detector un anillo metálico resonador con una pequeña abertura a cuyos extremos soldó dos bolitas de latón que al colocarse transversalmente a la dirección de estas ondas, conseguía cortas corrientes de inducción que el campo magnético variable producía de acuerdo con Lenz. Las fuerzas electromotrices eran lo suficientemente intensas para conseguir que la chispa saltara entre los extremos del anillo detector a varias decenas de metros del foco de las ondas.

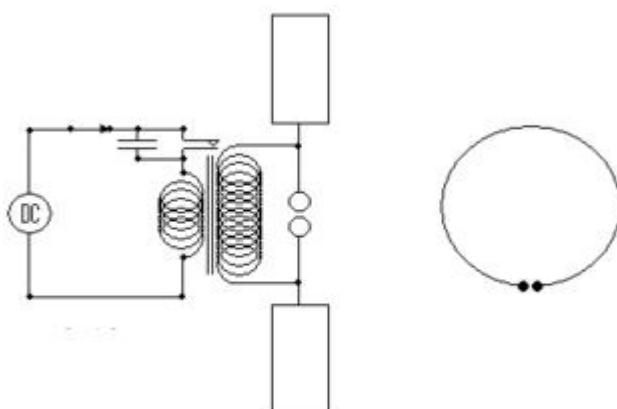
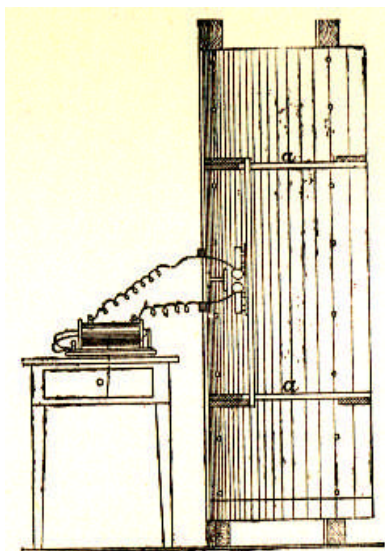


fig . 3.91 Diagrama del primer oscilador



fig. 3.92 Materiales originales del primer emisor de Hertz

En experiencias que duraron cinco años, Hertz midió la velocidad de estas ondas, modificó sus bolitas emisoras hacia antenas bipolares, comprobó que se reflejaban en superficies planas metálicas con un ángulo igual al de incidencia, convergían a un foco cuando incidía un frente plano en superficies metálicas parabólicas y se reflejaban como ondas planas cuando un foco emisor de ondas esféricas se colocaba en el foco.



pantalla metálica parabólica

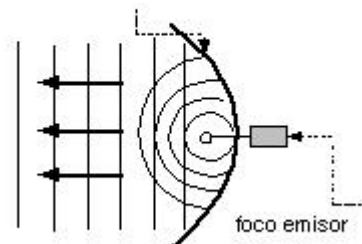


fig.. 3.93 Reflexión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia

Menos conocida es la refracción y dispersión de estas ondas, como verificó al hacerlas incidir en un prisma de parafina

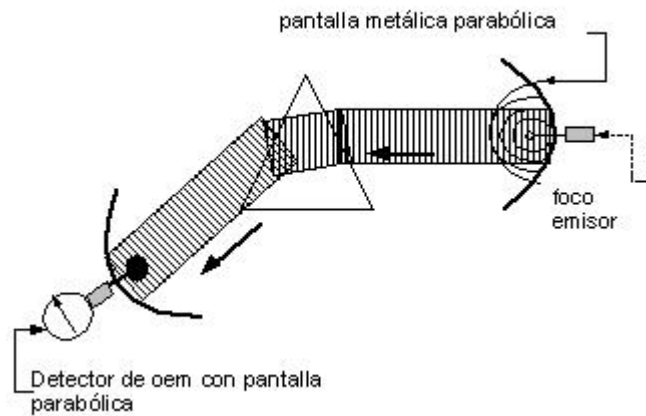


fig.. 3.93 Refracción y dispersión de ondas electromagnéticas de alta frecuencia

Hertz murió a los cuarenta años de una septicemia poco después de haber manifestado ante la pregunta de un alumno, que aparte de su importancia teórica, no les veía ninguna aplicación práctica a sus ondas. En su honor, la unidad de frecuencia lleva su nombre:

$$1 \text{ Hertz} = 1 \text{ ciclo/s}$$

ANEXO VI

UNIDAD DIDÁCTICA: ONDAS Y LUZ EN EL TIEMPO



INTRODUCCIÓN A LA ÓPTICA

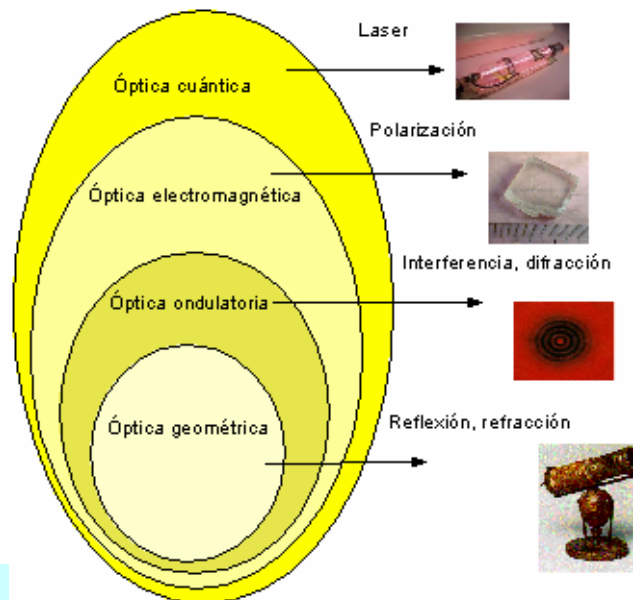


fig 6.1



La Óptica de rayos permitió manipular los rayos procedentes de los focos de luz y de los cuerpos que la reflejaban para agrandar, reducir, reflejar o desviar las imágenes a voluntad. Sin embargo este proceso tenía unos límites a partir de los cuales, las imágenes se veían borrosas, deformadas, o impregnadas de colores que hacían que la ganancia en tamaño fuera perjudicial para la observación. Isaac Newton, fue el primero que centró su atención en la aparición de los colores en los bordes de las lentes sobre las que incide luz blanca, y afirmó que esta luz, aparentemente la más pura, no era más que una mezcla de luces de distintos colores.

Como tantas veces en la ciencia, Isaac Newton construyó un modelo, que intentaba explicar la realidad en términos de leyes matemáticas y regularidades que fueran capaces de predecir resultados de nuevas observaciones o experimentos. Profundizó más que nadie por aquél entonces, en un intento de comprender la naturaleza de la luz creando una nueva rama de la Física: la Óptica física, que para muchos autores, incluye la Óptica ondulatoria y la electromagnética. Para ello ideó y realizó tal cantidad de experiencias que pensó que había conseguido descubrimientos definitivos, pero que la complejidad del problema le aconsejaba reducir al máximo las hipótesis explicativas y limitarse en lo posible a las evidencias a fin de no caer en los garrafales errores de Descartes. Su forma de progresar en el conocimiento fue la aplicación sistemática del Experimentum Crucis, un método que ayuda a escoger la solución correcta de entre dos hipótesis igualmente válidas a priori. El desarrollo de la ciencia ha necesitado hasta nuestros días de un contraste entre la experiencia y la propuesta de modelos que expliquen la realidad: la observación sistemática ha mostrado fenómenos desconocidos que hay que analizar posteriormente, pero muchas veces esa observación no es neutral sino que uno dedica su atención a cosas sobre las que ha pensado previamente, y sus prejuicios iniciales le hacen concluir leyes contradictorias a las de otros observadores. Por ello la ciencia es una vía muy laboriosa y a veces contradictoria para obtener conocimientos fiables.

Fue tan grande la autoridad del maestro, que durante todo un siglo, la comunidad científica (a excepción de los heterodoxos Huygens, Goethe y Euler) considerando que sus aportaciones eran indiscutibles, permaneció estancada en sus mismos errores, demostrando con ello un dogmatismo mayor que el del maestro. La ciencia de la Ilustración Europea que apostó por el reinado de la razón frente al oscurantismo de las causas ocultas, no supo estar en la práctica a la altura de sus propósitos.

En el siglo XIX, aparece una nueva generación de científicos capitaneados por el francés Augustin Fresnel, que integra la aplicación de la Matemática a sus interpretaciones, y la prioriza a las explicaciones mecánicas. Como tantas veces, algunos pensaban que en la ciencia se progresa más explicando los *cómos* que los *porqués*. Para los espíritus críticos del siglo XIX, la Óptica de Newton hacía agua por demasiados sitios: para explicar la periodicidad y la polarización de la luz, tenía que acudir de nuevo a las causas ocultas que tanto censuró en Descartes, invocando supuestos corpúsculos de luz poseedores de *fits* que explicaban la primera, o polos transversales para interpretar la doble refracción del Espato de Islandia. Además, el problema del éter gravitaba en cualquier explicación: si la luz era una onda necesitaba un medio para propagarse, pero si eran corpúsculos, su existencia suponía que no debían encontrar a su paso resistencia apreciable. El inglés Thomas Young y el francés Agustín Fresnel, fueron los delfines de una escuela que vio mucho más coherente partir de menos supuestos iniciales, aunque revolucionarios, en tanto que consiguieran unificar la explicación de más fenómenos. Con ellos nació la Óptica ondulatoria que describe los tópicos de fenómenos tan oscuros hasta entonces como la interferencia, difracción y polarización con una precisión asombrosa.

Cincuenta años después, Faraday, Maxwell y Hertz dieron un nuevo impulso a las aportaciones ondulatorias descubriendo relaciones desconocidas entre el electromagnetismo y las ondas de luz, como que el vector transversal de la luz que explica la polarización, no es más que un vector eléctrico variable en el tiempo y el espacio, o que debían existir otras ondas no visibles de la misma naturaleza que las luminosas. La Óptica física o electromagnética adquiere desde entonces una armonía y generalidad sólo comparable a la Gravitación Universal.

Cuando todo parecía cerrado, los fotones de Plank y Einstein de principios del pasado siglo, obligaron a reorganizar el sólido edificio que alojaba las ondas hertzianas. La Óptica sufrió un tercer renacimiento del que aún no hemos salido, que nuestra sociedad ha hecho protagonista de la tecnología civil y militar



Debes destacar:

La Ciencia es una empresa colectiva en la que cada científico parte de los conocimientos aportados por colegas anteriores, para avanzar apoyándose en ellos, o para rebatirlos. Hasta que se asienta una verdad científica, hay que convencer de modo fehaciente a los contemporáneos, que a veces no están a la altura de los grandes descubrimientos. No hay conocimientos definitivos en la Ciencia, sólo etapas más o menos importantes..

Para acercarte a su comprensión, pensamos que debes iniciar su estudio con una visión amplia que entienda el avance de los conceptos científicos como una empresa humana sometida a sus contextos, y que separe el grano conceptual de la paja de los necesarios desarrollos matemáticos

EL VOCABULARIO DE LA CIENCIA

Esta Unidad reivindica el protagonismo de los creadores de la Ciencia y de su vocabulario, a menudo dejados al margen de su estudio. No hacerlo así, dará lugar a una sensación de inseguridad cuando se autoevalúa la validez de los conocimientos adquiridos. Aunque hay que asumir que no existe una definición cerrada de lo que es la ciencia, los modelos científicos o el método científico, hemos seleccionado de los diccionarios y artículos, las que consideramos más consensuadas:

Ciencia experimental

En contra de lo que a veces se piensa, la ciencia no pretende opinar sobre temas que no son de su incumbencia dejando a otras ramas del saber como la Filosofía o la Teología las respuestas. Es por tanto un conocimiento parcial el que nos da.

La ciencia experimental se ocupa exclusivamente del estudio del universo natural, ya que por definición todo lo que puede ser detectado o medido forma parte de él. Su resultado final es la construcción de una teoría.

En breve, la ciencia produce *modelos útiles* que nos permiten realizar *predicciones útiles*. La ciencia intenta *describir* aquello que "es", pero evita tratar de *determinar* qué "es" (lo cual es imposible por razones prácticas). La ciencia es una *herramienta útil*, un creciente cuerpo de entendimiento que nos permite enfrentar más efectivamente nuestro ambiente y adaptarnos a él tanto social como individualmente.

Hipótesis

Es la propuesta de una posible relación entre causa y efectos basada en las observaciones experimentales, en las consideraciones personales fruto de analogías con otros fenómenos y en las intuiciones científicas. Su validez se considera provisional.

Leyes científicas

Son patrones con los que se describe la conducta de la naturaleza. Identifica o describe relaciones (la mayoría de las veces con un formato matemático que relaciona datos numéricos) entre fenómenos observables. Son fruto de la observación repetida con variables controladas de los fenómenos y de la medición de las magnitudes asociadas. Las leyes, al contrario que las teorías, se prueban directamente por los datos. Podemos citar las leyes de Hooke, Newton o Coulomb como ejemplos.

Principio

De un significado muy similar al de la Ley Física, aunque más amplio y se concreta más en los aspectos cualitativos del fenómeno. Para Newton un principio está probado por los fenómenos. Se procede por análisis de las fuerzas de la naturaleza y de sus leyes, y desde allí, por síntesis, muestran la constitución del resto. Los principios de la Termodinámica son fruto de infinidad de observaciones y medidas previas por lo que se consideran totalmente fiables dentro de los límites de estudio del fenómeno.

Teorías científicas:

Una teoría científica es un marco conceptual abstracto hipotético-deductivo que constituye una explicación o descripción científica a un conjunto relacionado de observaciones o experimentos que predice nuevos hechos y fenómenos. Una teoría científica está basada en experimentos controlados y reproducibles, y

hipótesis o supuestos verificados por grupos de científicos individuales (en ocasiones un supuesto, no resulta directamente verificable pero sí la mayoría de sus consecuencias). Abarca en general varios principios y leyes científicas verificados y frecuentemente deducibles de la propia teoría.

Una teoría es algo más complejo que un modelo científico aunque a veces se usan indistintamente. La teoría se aplica a la realidad aplicando los modelos al estudio de los fenómenos específicos. En contra de lo que se piensa vulgarmente una teoría científica, es algo más complejo y fiable que una hipótesis, pues necesita de varias confirmaciones experimentales y haber demostrado su capacidad de predicción de fenómenos nuevos.

Las teorías Gravitatoria (de Newton), la de la Evolución (de Darwin) o la de la Relatividad (de Einstein), son construcciones muy elaboradas sobre sólidas bases y discusiones.

Modelo Científico

Es una representación conceptual o física a escala de un proceso o sistema real (fenómeno), deliberadamente simplificada con el fin de analizar su naturaleza, desarrollar o comprobar hipótesis o supuestos y permitir una mejor comprensión del fenómeno real al cual el modelo representa.

Es una idealización de la realidad que incluye elementos del sistema, y los conceptos y las interrelaciones más relevantes entre ellos que parecen los más importantes en la determinación del fenómeno. Para hacer un modelo es necesario plantear una serie de hipótesis, de manera que lo que se quiere representar esté suficientemente plasmado en la idealización, aunque también se busca, normalmente, que sea lo bastante sencillo como para poder ser manipulado y estudiado.

Otra acepción dice que el modelo es una representación visual de la teoría usualmente basada en una analogía con un fenómeno conocido

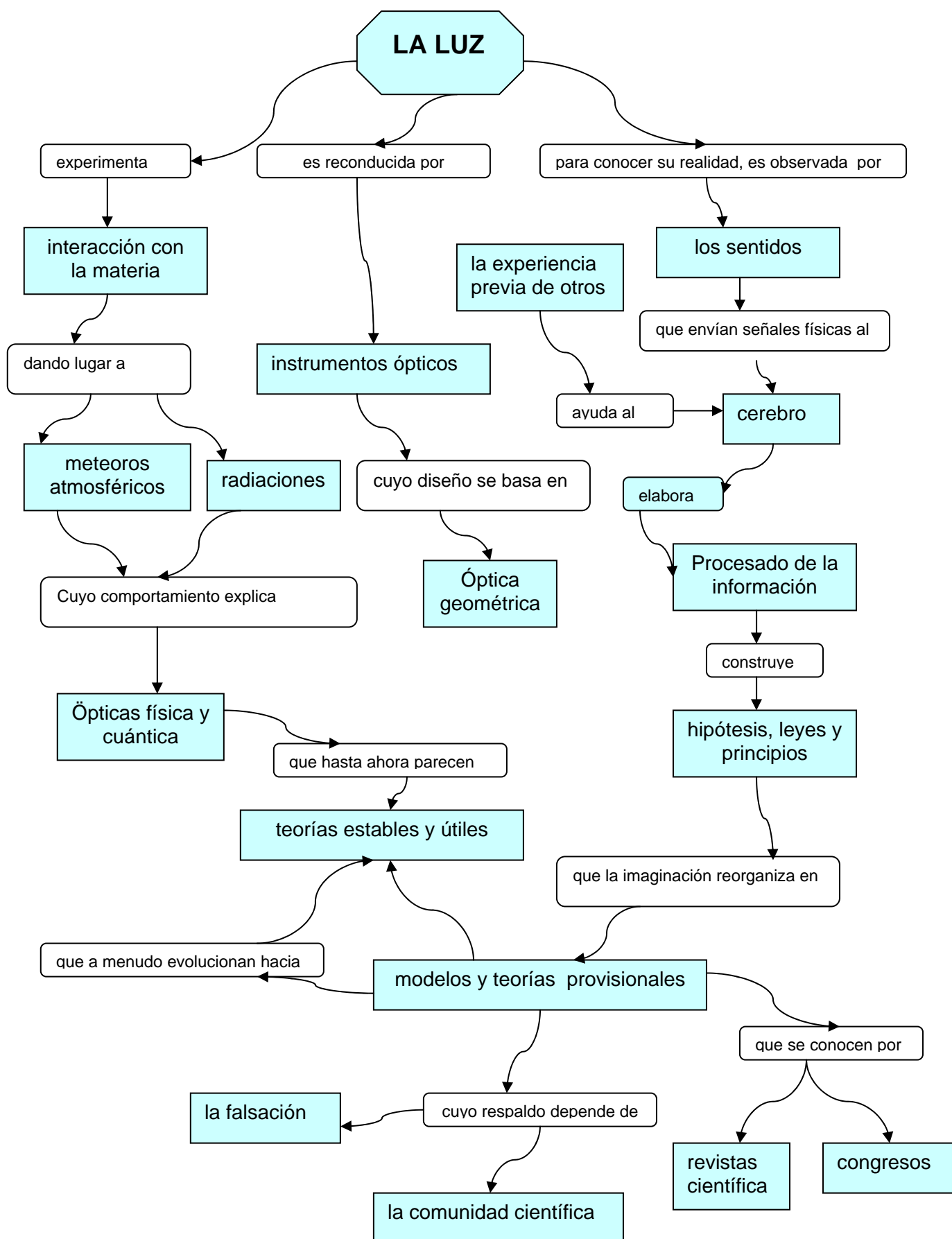
El modelo atómico de Rutheford, ondulatorio y el corpuscular de la luz son ejemplos de ellos.

Método científico

El modo de establecer leyes y principios fiables en Ciencia se rige por un protocolo llamado el método científico. Si bien no siempre se siguen todas las fases que se enuncian, es bueno tener una referencia ideal. Según ella, consiste en una secuencia de acciones:

1. Observación y recopilación de datos
2. Emisión de hipótesis y generalizaciones sobre las observaciones.
3. Predicciones derivadas de las generalizaciones.
4. Emisión de conclusiones derivadas de las generalizaciones

MAPA CONCEPTUAL GENERAL DE LA LUZ



6.1 LA OPTICA DE RAYOS

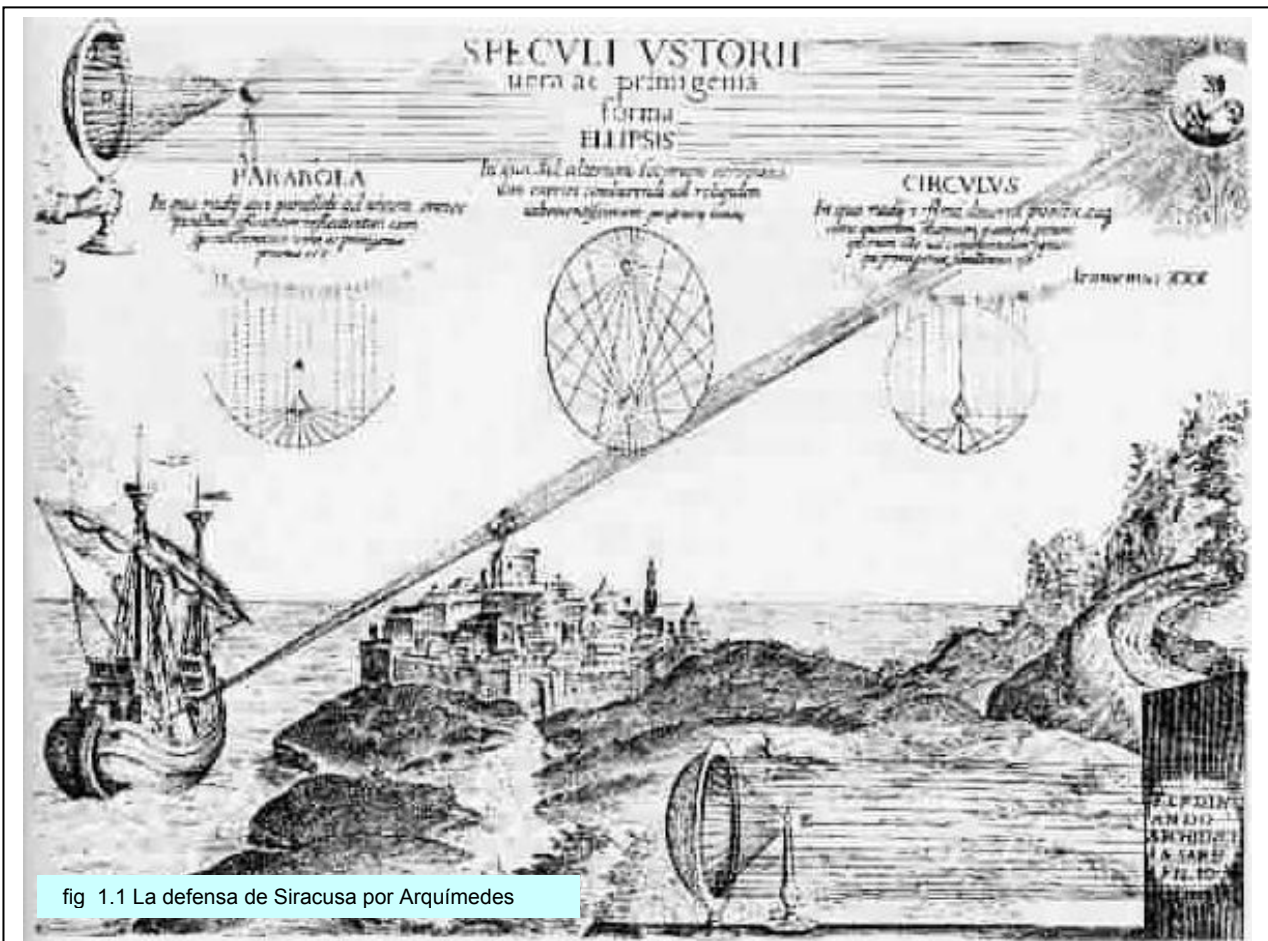


fig 1.1 La defensa de Siracusa por Arquímedes

SUMARIO

0. Introducción
1. La cámara oscura
2. Convenio de signos
3. La reflexión
 - 3.1 Espejos planos
 - 3.2 Espejos esféricos cóncavos
 - 3.3 Espejos esféricos convexos
4. La refracción
 - 4.1 La ley de Snell
 - 4.2 El ángulo límite
 - 4.3 El prisma: ángulo mínimo
 - 4.4 Dispersión de la luz
 - 4.5 El dioptrio esférico.
5. Las lentes
 - 5.2 Fórmulas de las lentes
 - 5.1 Imágenes de las lentes convergentes delgadas
 - 5.2 Imágenes de las lentes divergentes delgadas.
6. Los Instrumentos ópticos
7. Las aberraciones ópticas
8. Actividades avanzadas



fig 1.2. Rayos solares crepusculares difractados en las nubes

En el Egipto de los faraones ya existían espejos metálicos destinados por sus mujeres para tocador (Sesostris II, 1900 AC). Probablemente también se usaban para conducir la luz del sol hasta los trabajos de las galerías de las pirámides, mediante reflexiones múltiples. Siglos después, el chino Confucio ya aconseja en el 500 AC de la conveniencia de usar lentes, y se habla de hallazgo de lentes en Babilonia, pero hay que esperar hasta la antigua Grecia la aparición de explicaciones plausibles de los fenómenos ópticos.

A partir de entonces se suceden con distinta fortuna las explicaciones al comportamiento de las imágenes y de su registro por la visión: para Empédocles y Pitágoras era el ojo el que emitía rayos con los que registraba la imagen (teoría intromisiva), y para Epicuro era el objeto el que emitía efluvios que el ojo detectaba (teoría extromisiva). Platón y Aristóteles las matizan y a partir de entonces inicia el cuerpo teórico de esta disciplina. Gracias a él, se construyeron los espejos convergentes de Arquímedes que quemaron las naves romanas en su defensa de la ciudad griega de Siracusa y se construyeron los telescopios de Galileo y Kepler utilizados con fines bélicos y astronómicos que asentaron el nuevo paradigma heliocéntrico.

Hoy diremos (de acuerdo con la definición de la Optical Society of America) que la Óptica es el estudio de la luz, de la forma en que se propaga por los medios transparente, y de la forma en que es absorbida por otros cuerpos.

El estudio de la luz, que comienza históricamente por la Óptica Geométrica (o de rayos), es el que seguiremos en este trabajo. Se fue depurando hasta adquirir un cuerpo sólido a partir del siglo XVI gracias a los trabajos del astrónomo holandés Snell y del matemático francés Descartes. Su objeto es el estudio de los fenómenos ópticos más comunes como la reflexión y la refracción de luces monocromáticas. Está basada en el concepto de rayo luminoso individual nacido de la observación de la trayectoria de la luz del sol al atravesar pequeños orificios y la aparición de las sombras de los obstáculos. Aún hoy, sus principios son suficientes para explicar de modo razonable fenómenos como el arco-iris, diseñar dispositivos ópticos, o solucionar problemas refractivos de la visión. Se basa en los siguientes principios:

Un objeto está formado por infinidad de puntos de los que salen haces de rayos individuales en todas direcciones.

- Los rayos luminosos viajan en línea recta sin desviarse en tanto no cambie el medio.
- Los rayos de luz son reversibles en sus trayectorias. Esto significa que si el rayo individual sale de la posición P aunque se desvíe en una serie de medios para llegar a la Q, otro rayo que salga de Q llegará igualmente hasta P por la misma trayectoria.

LA CAMARA OSCURA

La autoridad indiscutible de la antigüedad en temas de óptica hasta la llegada de Newton, fue el persa Ibn al Haythan (también llamado Alhazen por los cristianos). Es el primero que da argumentos experimentales a favor de la teoría extromisiva de la luz que defiende que son los objetos los que emiten los rayos en línea recta hacia el ojo. La traducción de su texto de Óptica, *Kitab al Manazir*, es la referencia de todo el mundo culto europeo desde el siglo X hasta el XVI.

Se dice, entre otras versiones, que fue el diseñador de la primera cámara oscura practicando un pequeño orificio en una pared exterior de un edificio. Un observador situado dentro de la habitación, observaba en el tabique interior la imagen invertida del paisaje externo.

Es sencillo construir una con una caja de cartón cerrada en una de cuyas paredes laterales se practica un pequeño agujero (de orden de décimas de milímetro). En el



fig 1.3 Fresco del pintor Tomaso da Modena pintado en 1352, donde se muestra por primera vez una persona con anteojos,



fig 1.4 El matemático, astrónomo y óptico persa Alhazen

otro extremo de la caja se recoge una imagen que puede observar en un papel traslúcido o en una película fotográfica. Tanto si el agujero se hace mayor como si disminuye, la imagen comienza a hacerse borrosa.

En la primera figura, el objeto AB, los rayos emitidos atraviesan una rendija muy estrecha y se produce una correspondencia aceptable entre cada punto del objeto y su proyección. La imagen se observa en la pantalla nítida, invertida y real.

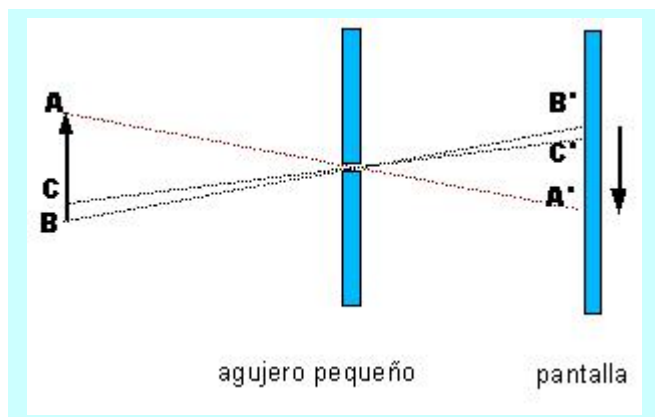


fig 1.5 Cámara oscura

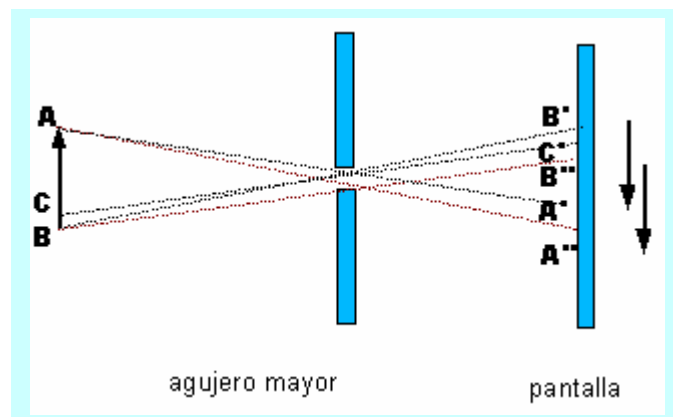


fig 1.6 Cámara oscura 2

En la segunda, el agujero es mayor. En la pantalla solapan las imágenes B'A', B''A'' en distintas posiciones. La imagen de cada punto A se convierte en una mancha de diámetro A'A'' etc. y a los puntos intermedios de esa mancha llegan ahora rayos de otros puntos como el C. La imagen degenera rápidamente en una zona borrosa.

Si por el contrario, la rendija se estrecha drásticamente, la imagen también deja de ser nítida. Tras atravesar la rendija, la luz de cada punto A, debido al fenómeno de la *difracción* que estudiaremos en el tema siguiente, se ensancha en una mancha con varios anillos concéntricos oscuros y luminosos. El concepto de rayo único deja de tener sentido y es necesario acudir a la Óptica Ondulatoria.

La construcción de una cámara oscura a partir de una caja de zapatos o de madera en uno de cuyos frontales se practica un pequeño agujero y en el otro un recorte sobre el que se pega un trozo de papel vegetal, es sumamente ilustrativa.



fig 1.7 imagen de una vela en una cámara oscura

LOS ECLIPSES Y LA CÁMARA OSCURA

La ocultación parcial o total del sol cuando la luna se interpone entre la Tierra y el Sol, se dice eclipse de Sol mientras que si es la Tierra la que se interpone en la iluminación de la Luna, se dice eclipse de Tierra. La observación de ambos, ha dado pie desde la antigüedad a interpretaciones míticas y a observaciones científicas sin fin. Aristóteles (IV AC) a la vista de la sombra de la Tierra sobre la Luna, propuso con acierto la forma esférica para nuestro planeta.

Las sombras y penumbras observadas en las distintas zonas de los eclipses se interpretan fácilmente con el modelo de Óptica de rayos

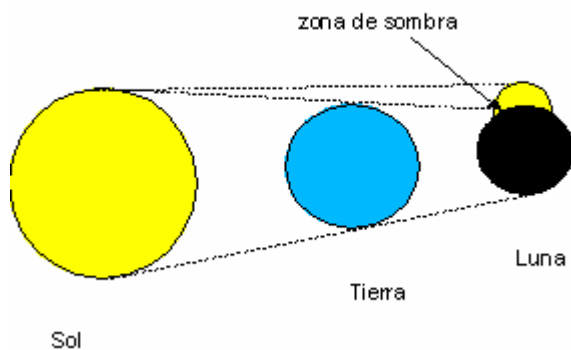


fig. 1.8 Eclipse de luna

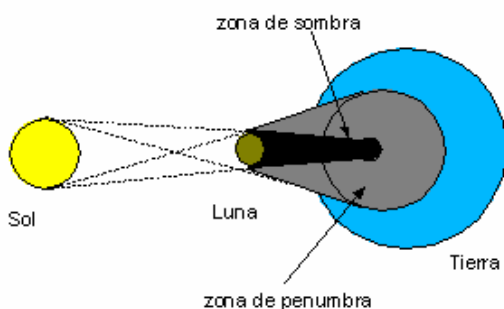


fig. 1.9 Eclipse de sol



Durante los eclipses solares, se observan en el suelo infinidad de imágenes de la parte del Sol que la Luna no ha ocultado, cuando la luz pasa a través de las hojas de los árboles. Fue Johannes Kepler quien explicó por primera vez la causa del fenómeno identificando el hueco de las hojas como un agujero de una cámara oscura que permite la formación de varias imágenes. El hecho de que los extremos de la Luna se vean difuminados dio lugar a que Kepler desarrollara su teoría de rayos ópticos hasta el mayor techo de la Óptica de su época.



fig. 1.9 Imágenes del sol tras las hojas de los árboles en un eclipse de sol

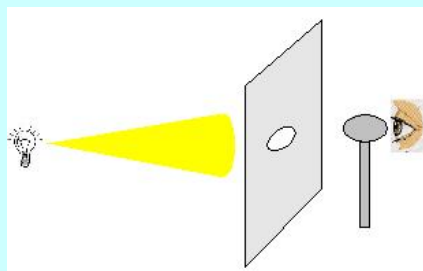


fig 1.10

EL ALFILER INVERTIDO

Objetivos : afianzar la construcción de imágenes mediante rayos geométricos

Materiales: un alfiler, una hoja de papel con un pequeño agujero (0,5 mm)

Montaje y observaciones: Mirando a través de un agujero practicado en un papel hacia una zona iluminada, colocamos muy próximo al ojo un alfiler. Se observa el pequeño agujero luminoso atravesado por la sombra del alfiler donde éste se ve ¡con la cabeza hacia abajo!.

La paradoja es comprensible si pensamos que, sin alfiler, se observa una imagen invertida del foco de luz exterior, puesto que el agujero hace de cámara oscura. En este caso, la cabeza del alfiler, tapa la luz que veríamos en la zona inferior y de ahí la sombra observada.

CONVENIO DE SIGNOS DIN

Existen en los textos de Óptica, distintos criterios en los convenios de signos para las distancias y los ángulos que dan lugar a múltiples confusiones. Proponemos por su sencillez y generalización elegir las normas DIN.

De acuerdo con ella, supondremos que los rayos del objeto proceden del lado izquierdo del espejo o la lente a una distancia s negativa del centro óptico S , y que el objeto que se estudia está en posición vertical con un tamaño y positivo a una distancia s positiva del citado centro. Distancias a la izquierda del centro óptico son positivas y a la derecha negativas. Tamaños de objeto e imagen verticales son positivos si están por encima del eje óptico y negativos si están por debajo. En el ejemplo de la figura, la distancia s' es negativa y el tamaño del objeto y' es positivo.

Como regla mnemotécnica podemos asociar este convenio de los signos con el de los ejes cartesianos x, y .

Si se trata de medir ángulos respecto a la normal, se elige el sentido horario como positivo comenzando por el rayo. Si los ángulos son con el eje óptico, se toma como positivo el sentido antihorario.

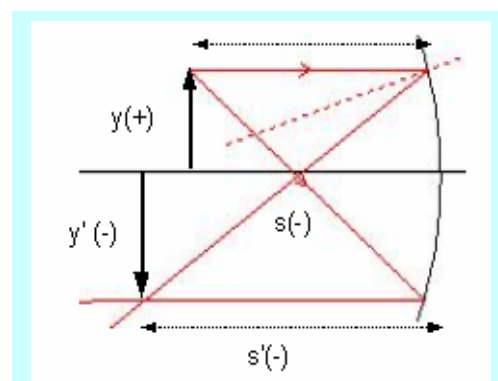


fig 1.11

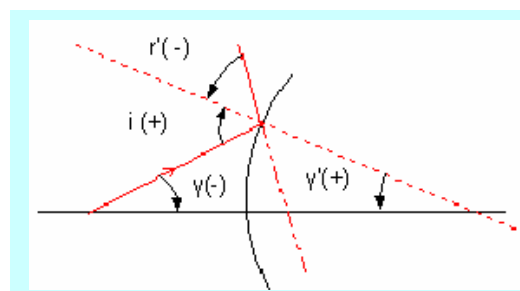


fig 1.12

LA REFLEXION DE LA LUZ

Los espejos iniciales estaban formados por una superficie plana muy pulimentada metalizada. En ellos se producía una reflexión del rayo incidente con pérdidas mínimas por absorción. Sin embargo hoy día, la mayoría se fabrican depositando una delgada capa de aluminio, amalgama o mercurio en la cara posterior de un vidrio. De este modo la superficie se deteriora menos aunque la cantidad de luz reflejada sea menor.

A efectos de aclarar un error muy persistente, diferenciaremos entre imagen real e imagen virtual. La primera es aquella en que los rayos procedentes de un objeto se pueden recoger en un vidrio deslustrado a modo de pantalla. Un *fotómetro* detectaría en ella la existencia de energía radiante. La imagen es **real**, y puede a su vez reemitir luz como si de un nuevo objeto se tratase. Si esto no es posible pero al observar las prolongaciones rectas de los rayos convergen todas en un punto situado al otro extremo del espejo, diremos que la imagen es **virtual**.

Cuando el rayo encuentra una superficie reflectante metálica pulida, casi toda la energía del rayo se refleja en otro rayo que forma con la normal a la superficie un ángulo igual al de incidencia. La reflexión se dice entonces **especular**. Si la superficie es rugosa, la normal de cada punto cambia de dirección y los rayos reflejados lo hacen sin ningún concierto. La reflexión se llama ahora **difusa**. Sólo se percibe el brillo de la superficie pero ninguna imagen nítida.

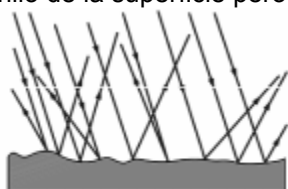


fig 1.13

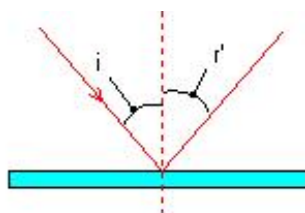


fig 1.14

Los espejos que estudiaremos son los planos y los esféricos (cóncavos y convexos). Son elementos importantes de estos últimos:

- El eje óptico: la línea que pasa por el centro óptico y por el centro del espejo. Cualquier rayo cuya prolongación pasa por él, se refleja sin desviarse.
- Eje secundario: cualquier línea que pase por el centro de curvatura. Coincide con la normal a la superficie en el punto.
- El centro de curvatura: es el centro geométrico del espejo.
- El foco: es el punto por el que pasan todas las reflexiones de los rayos que inciden paralelamente al eje óptico.
- Radio de curvatura: es el radio del espejo. Cualquier rayo que pase por él o su prolongación, se refleja en la misma línea.
- La distancia focal: es la distancia del foco al centro de curvatura. En la aproximación anterior, el foco se encuentra a la mitad del radio sobre el eje óptico. Verifica la propiedad de que cualquier rayo que llegue horizontal al espejo, se refleja de modo que su prolongación pase por el foco. También sucede que cualquier rayo que salga del foco, se refleja paralelamente al eje óptico.

Aplicando estos sencillos principios, se construye la imagen que forma el sistema de cualquier objeto.

La óptica que estudia los comportamientos de los espejos que reflejan rayos luminosos se llama *Catatóptica*.

Los espejos planos

Desde antiguo se sabe que elegido un rayo luminoso concreto que se refleja en un espejo, el ángulo que forma el rayo incidente con la normal, i , tiene el mismo valor que el que forma el reflejado con la misma, r .

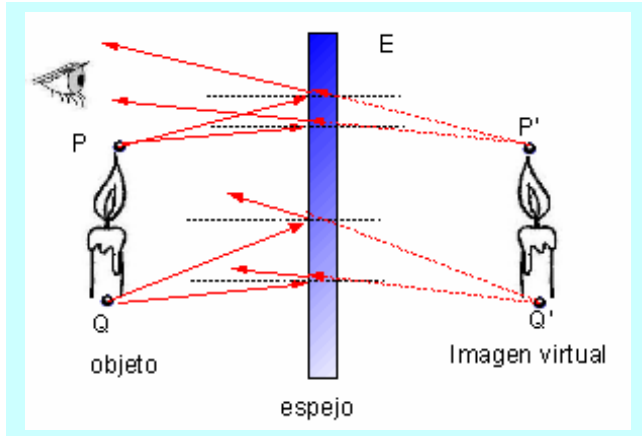


fig 1.15

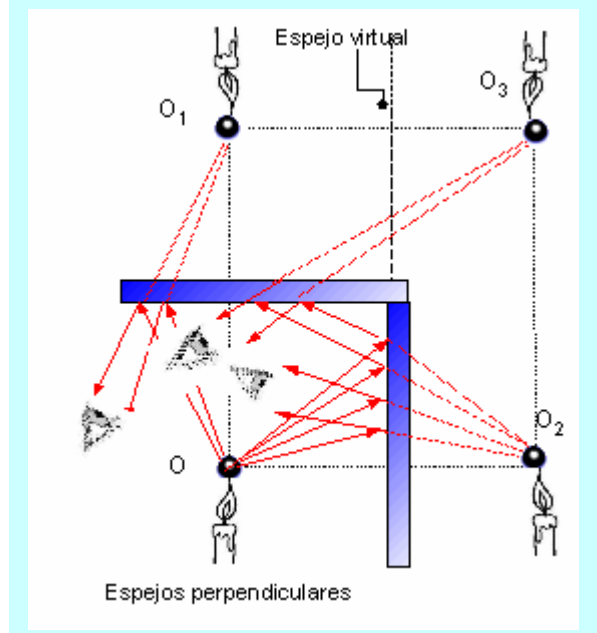


fig 1.15

Si en lugar de un único punto emisor de luz, consideramos que un objeto está formado por infinitud de focos puntuales, un observador a cuya posición llegan los rayos que refleja un espejo plano de uno concreto P, interpretará que sus prolongaciones proceden de un foco simétrico P' situado al otro lado del espejo. Otro punto Q del objeto se reflejará de modo que los rayos reflejados converjan ahora en Q' . El resultado es una imagen **virtual** en una posición simétrica y de tamaño idéntico al objeto.

Si se colocan dos espejos con una arista común formando un ángulo de 90° se obtienen tres imágenes de un objeto O: una de cada espejo O_1 y O_2 , además de una tercera procedente de dos reflexiones sucesivas en la posición O_3 . La construcción gráfica de esta última se hace reflejando por ejemplo la imagen O_1 en el espejo virtual.

Con otro ángulo, una construcción similar da un número de imágenes creciente dado por la expresión

$$n = (360^\circ / \alpha) - 1$$

Si en el montaje anterior el objeto se encuentra en la bisectriz, el rayo reflejado sale en la misma dirección, como podemos comprobar con un pequeño puntero Laser. Si el montaje consta de tres espejos mutuamente perpendiculares, formando un triedro trirectángulo, el rayo reflejado sale en la misma dirección que el incidente. Esta propiedad se aprovechó para medir la velocidad de la luz: se colocó el sistema de espejos en la superficie lunar y se envió desde la Tierra una señal Laser. El rayo de vuelta se recogió en un detector con un temporizador próximo y se midió el tiempo de ida y vuelta. Conocida la distancia y el tiempo era trivial el cálculo de la velocidad de la luz.

ejemplos resueltos

Ejemplo 1

Una niña de 1,50 m de estatura tiene sus ojos a una altura de 1,40 m del suelo. Calcular el mínimo tamaño del espejo y la distancia (o distancias) para las que pueda verse de cuerpo entero

Debe reflejarse todo el intervalo AE luego estos son los puntos límite que deben reflejarse de manera que su rayo reflejado en el espejo sea observado en los ojos de la niña, B. De la igualdad de los ángulos de incidencia EFD y AHB con los de reflexión DFC y BHC, se deducen las igualdades de los segmentos $CD = DE$ y $AB = BC$. Por ello basta que el espejo tenga las dimensiones y la altura del gráfico para que verifique esa condición.

Es decir que la altura a la que debe situarse es $1,40 - 0,70 = 0,70$ m y su tamaño será de 0,70 cm.

Como se observa, el intervalo AB se refleja con estas dimensiones independientemente de la posición de la niña.

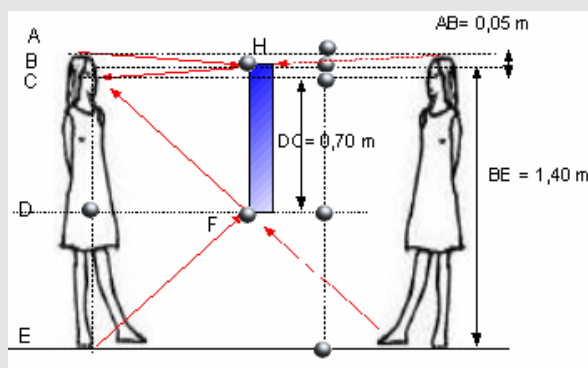


fig 1.16

Los espejos esféricos cóncavos

Cuando la superficie reflectante es un espejo esférico, se continúa verificando que el rayo reflejado forma con la normal un ángulo igual al de incidencia. Estos espejos tienen la ventaja de ser de fácil tallado aunque para la obtención de imágenes nítidas (condición de **estigmatismo**) los rayos deban incidir una zona próxima al eje óptico (zona paraxial).

En efecto: de la gráfica anterior se deduce que el triángulo BCF es isósceles puesto que los ángulos B y C son iguales. Como el lado BC coincide con el radio del espejo, el coseno del ángulo α en triángulo CFF' valdrá:

$$\cos \alpha = (R/2)/CF$$

Si el rayo llega dentro de una zona *paraxial* el ángulo α se hace muy pequeño y el coseno se puede aproximar a la unidad. En estas condiciones, podemos asignar a la distancia focal el valor de la mitad del radio.

$$CF = f = R/2$$

(Se propone como ejercicio demostrar que para los espejos convexos la relación es la misma).

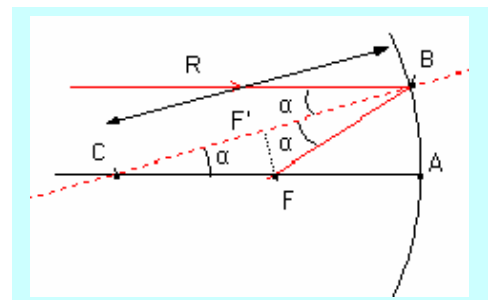


fig 1.17

Formación de imágenes en espejos cóncavos

Basta con trazar los rayos reflejados de los emitidos por dos rayos cualesquiera procedentes de un punto para localizar su imagen en la intersección de ambos. Si el objeto es extenso, suele bastar el dibujo de la imagen de dos puntos representativos para representar toda la imagen. Para su determinación gráfica se siguen las siguientes reglas:

- Un rayo que llegue paralelo al eje óptico, se refleja pasando por el foco.
- Un rayo que incida pasando por el centro, se refleja por la misma línea
- Un rayo que pasa por el foco, se refleja paralelamente al eje óptico.

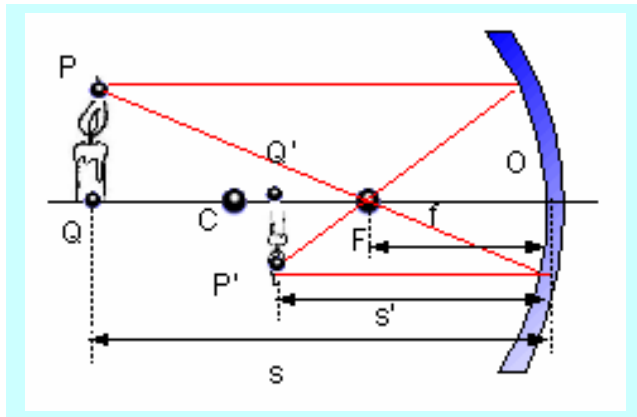


fig 1.18

Dependiendo de la posición del objeto respecto del centro óptico, salen cuatro casos distintos (se propone su construcción como ejercicio):

- Si el objeto está situado a la izquierda del centro de curvatura, la imagen obtenida es real, invertida y de tamaño menor,
- Si la base del objeto está sobre el centro, la imagen es virtual, invertida y del mismo tamaño.
- Si la base se sitúa entre el centro y el foco, la imagen es virtual, invertida, y mayor.
- Si el objeto se sitúa entre el foco y el centro óptico, la imagen es virtual, directa y de mayor tamaño.

Las aplicaciones prácticas de estos espejos, son muy frecuentes como espejos de tocador de señoras para conseguir una imagen virtual aumentada. En el caso de que un foco extenso y lejano como el sol los ilumine, la energía se concentra en la zona del foco del espejo. Esta propiedad se usa en el diseño de cocinas solares para su uso en hogares del tercer mundo.

A la inversa, un emisor puntual de luz situado en el foco de un espejo esférico cóncavo refleja la luz que les llega en un haz prácticamente paralelo al eje óptico.

Si la sección es parabólica la geometría es más adecuada para ambos propósitos, aunque de mecanizado más difícil. La parábola de los faros del automóvil refleja la luz de las lámparas de la luz larga y corta colocadas próximas al foco. Los telescopios reflectores astronómicos concentran en el foco de un espejo parabólico la luz de los astros.

Fórmulas de los espejos esféricos cóncavos

Sea P un foco puntual a una distancia s del espejo cóncavo AB. Su imagen P' estará situada en el eje óptico a una distancia s' del centro óptico S. De la ley de la reflexión, sabemos la igualdad de los ángulos que $i = r$



fig 1.19 Un espejo de tocador da una imagen real, invertida y mayor, de una vela situada entre su centro y el foco



fig 1.20 Los diseños de cocinas solares con espejos parabólicos para hogares del tercer mundo están teniendo un auge creciente.

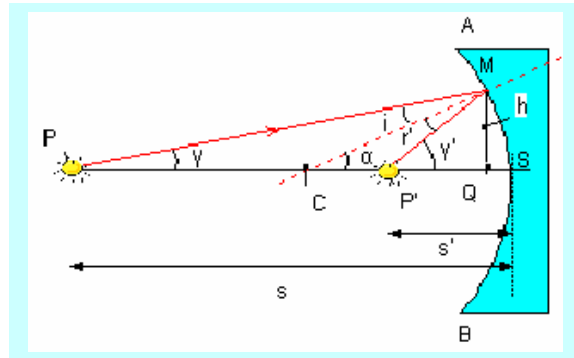


fig 1.21

Del triángulo PMC , tenemos que $\alpha = \gamma + i$ y del triángulo MCP' $\gamma' = \alpha + r'$

De las tres relaciones, obtenemos que $\gamma + \gamma' = 2\alpha$ (1)

Supuestas las condiciones paraxiales, podemos sustituir los ángulos por sus senos

$$\gamma \cdot \text{sen } \gamma = h/s, \quad \gamma' \cdot \text{sen } \gamma' = h/s', \quad \alpha \cdot \text{sen } \alpha = h/CS = h/R$$

llevando estas tres relaciones a (1) , queda la conocida fórmula de los espejos

$$1/s + 1/s' = 2/R = 1/f$$

Los espejos esféricos convexos

Repitiendo el proceso que dijimos para el caso anterior, con la única diferencia de que ahora el rayo ya no puede pasar por el centro de curvatura sino por la recta prolongación de la línea que pasa por el mismo, obtenemos una imagen que es siempre virtual, directa y menor que el objeto.

Estos espejos los vemos como retrovisores en los automóviles y anclados en las curvas muy cerradas donde consiguen la visibilidad de los vehículos que viene en dirección opuesta.

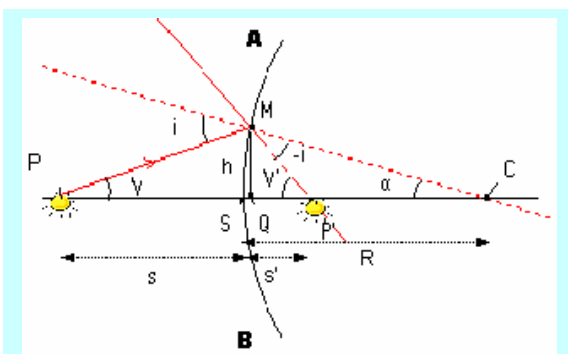


fig 1.22

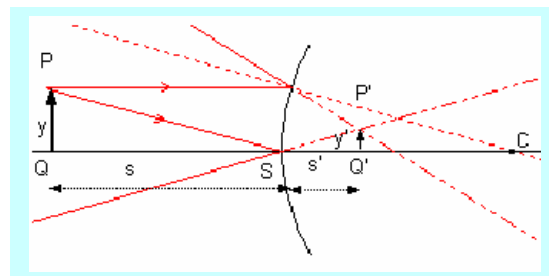


fig 1.23

La construcción de imágenes de puntos u objetos extensos es idéntica al caso anterior: para cada punto objeto basta trazar dos rayos. La intersección de sus reflexiones dará el punto imagen.

$$\begin{array}{ll} \text{Del triángulo } P'MC' & \alpha + \gamma = i \\ \text{Del triángulo } P'MC & \alpha + i = \gamma' \\ \text{Sumando las dos últimas} & 2\alpha = \gamma' - \gamma \end{array}$$

Como $\gamma \approx \text{sen}\gamma = -h/s$ (*) $\gamma' \approx \text{sen}\gamma' = h/s'$ $\alpha \approx \text{sen}\alpha = h/R$
(Nótese que el signo - se incluye para que el incluir el valor de s negativo, la expresión del seno sea positiva).y llegamos de nuevo a la fórmula general de los espejos:

$$1/s + 1/s' = 2/R = 1/f$$



fig. 1.24 Espejo convexo

En la figura, de la semejanza de los triángulos PQS y P'Q'S, se deduce la nueva relación entre el tamaño de la imagen y el del objeto que llamaremos *aumento lateral del espejo*.

$$y'/y = s'/(-s) = -s'/s = (f-s')/f = A$$

Ejemplo 1

Un espejo esférico cóncavo tiene una distancia focal de 10 cm. Determina la imagen y posición de un objeto de una altura de 4 cm la distancia de

- a) 25 cm b) 10 cm c) s cm

Solución

Expresamos en primer lugar los datos con los signos DIN correspondientes:

$$f' = -10 \text{ cm } y = +4 \text{ cm } s'_1 = -25 \text{ cm } s'_2 = -10 \text{ cm } s'_3 = -5 \text{ cm}$$

a.- Aplicando la fórmula de los espejos la istancia imagen será:

$$\begin{aligned} 1/s' + 1/s &= 1/f' \Rightarrow \\ s' &= -16,7 \text{ cm} \end{aligned}$$

Como el aumento lateral

$$\begin{aligned} A = s'/s &= -16,7/25 = -0,67 = y'/y \Rightarrow \\ y' &= 2,67 \text{ cm} \end{aligned}$$

Al estar a mayor distancia del espejo que el foco, era previsible que la imagen sea menor, real e invertida.

b.- Repitiendo el proceso:

$$1/-10 + 1/s' = 1/-10 \Rightarrow s' = 4$$

el objeto en el foco da una imagen en el infinito.

c.- Nuevamente:

$$1/-10 + 1/s' = 1/-10 \Rightarrow s' = +10 \text{ cm}$$

El aumento $A = 10/-5 = -2$ y el tamaño $y' = (-2)(-5) = +10 \text{ cm}$

Ahora la imagen es virtual, porque sale detrás del espejo, directa y mayor que el objeto

REFRACCIÓN DE LA LUZ

Cuando el rayo luminoso encuentra un medio transparente (como el vidrio), parte de la energía rebota en un rayo reflejado en la superficie de discontinuidad entre ambos medios, y otra porción de la misma la atraviesa formando un rayo refractado que se desvía un cierto ángulo r de su trayectoria inicial. Los ángulos de cada rayo con la normal a la superficie se llaman respectivamente de *incidencia* i , de *reflexión* r' (igual al de *incidencia*) y de *refracción* r . La cantidad de energía del rayo inicial que se reparte entre ambos rayos, depende de la inclinación de la incidencia y de las características del medio. Los antiguos refractómetros como el de la figura, utilizados por Vitelo, Kepler, Snell, Descartes y Newton permitían la medida de estos ángulos.

Aunque los árabes ya conocían la relación correcta entre estos ángulos (Abu Sa'da Ibn Sahl, 940-1000) le cabe al astrónomo holandés Willebrod Snell, el honor de su enunciado formal. Snell establece de forma definitiva la ley que lleva su nombre y aunque no la publica, sabemos de ella por su correspondencia privada. Es probable que Descartes, diez años después, los leyera y enunciara la ley de un modo más matemático sin citar su origen.

La medida de los ángulos implicados se hacía con *refractómetros* como el de la figura que permite medir las trayectorias de los ángulos de la luz procedente del espejo M en su camino a una cubeta semicilíndrica con un *goniómetro* (medidor de ángulos) muy preciso.

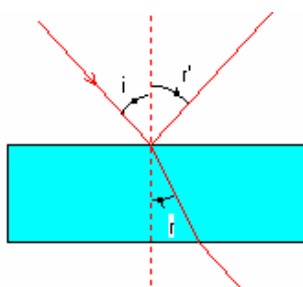


fig 1.26

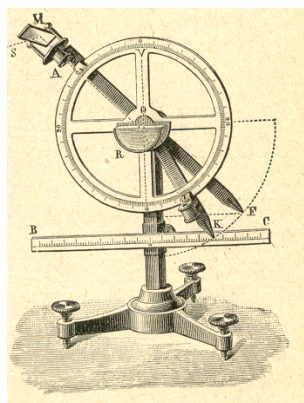


fig 1.27



fig 1.25

Según aumenta la incidencia también lo hace la refracción. A lo largo de la historia se hicieron varias medidas de las desviaciones de los ángulos en la espera de encontrar proporcionalidades y leyes sin éxito. En el el siglo II DC el griego Ptolomeo tabuló los ángulos de incidencia y refracción de un rayo luminoso en el agua intentando obtener regularidades entre ambos y obtuvo un resultado parecido al siguiente. Mientras que para ángulos pequeños la relación i/r permanece constante, no sucede lo mismo para ángulos mayores de 30° .

Ángulo de incidencia i	Ángulo de refracción r	Relación i/r
0	0	indeterminada
10	7	1,50
20	13	1,50
30	20	1,53
40	25	1,59
50	31	1,63
60	35	1,71
70	39	1,81
80	41	1,97

La ley de Snell

Snell (y después Descartes) no utilizaron la razón trigonométrica seno sino relaciones equivalentes entre segmentos. En notación más moderna, diremos que sus resultados confirmaron que lo que se mantenía constante era el cociente de los senos de ambos ángulos.

$$\text{sen } i / \text{sen } r = n_2/n_1 = \text{cte}$$

Que conocemos como la *Ley de Snell*, (a veces *Ley de Descartes*) donde n_1 y n_2 son los *índices de refracción* en el medio y en el vacío. En los gases como el aire, el índice se puede aproximar a la unidad (en condiciones normales)

Aunque sus descubridores la expusieron geoméricamente, es más cómodo expresarla en la forma actual

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$$

La ley de Snell, fue una herramienta importante que aún se utiliza asiduamente. Gracias a ella, Descartes construyó lentes para montar telescopios y microscopios considerablemente mejores que los de Galileo y Leewok, que estaban basados en un conocimiento muy superficial de la trayectoria de los rayos. De su utilidad nos dan cuenta la infinidad de aplicaciones ópticas y médicas que la tienen como punto de partida.

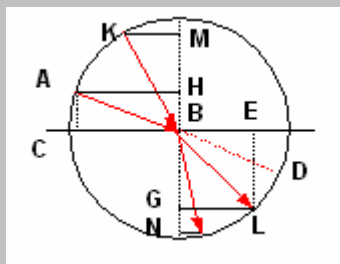
Contexto histórico



Los otros lenguajes de la Física

Ni Snell ni Descartes expresaron su ley en función del seno de los ángulos aunque este último ya conociera la función trigonométrica. ¿Puedes relacionar la forma actual con el enunciado histórico que Descartes hace de la misma?

...Cuando los rayos pasan oblicuamente de un cuerpo transparente a otro, que los recibe más o menos fácilmente que el primero, se desvían... Sólo hay que tener cuidado de que la inclinación de los rayos se debe medir por la cantidad de líneas rectas como CB o AH y EB ó IG, y, semejantes, comparar las unas a las otras: no por la de los ángulos como ABH o GBI, ni mucho menos por la de las semejantes a DBI; pues la razón o proporción entre que hay entre esos ángulos varía con con las diversas inclinaciones de los rayos, en lugar de la que existe entre las líneas AH y LG, o semejantes, permanece la misma en todas las refracciones que son causadas por los mismos cuerpos



DESCARTES, *La Dioptrique*, 1637, pp 21-22

fig 1.28



fig 1.29

Tanto para las matemáticas como para la filosofía, la figura de Descartes, supuso una revolución de métodos e ideas. Sin embargo, en su interpretación de las causas que mueven los planetas y las que desvían los rayos de luz, fracasa rotundamente. Su lógica resistencia a aceptar la existencia de fuerzas a distancia, le hizo buscar una interpretación *mecanicista* (choques y contacto entre minúsculas partículas) ya fuera a las órbitas planetarias, a la propagación de la luz o a sus desviaciones al encontrar medios más consistentes. Explicaba la desviación de la trayectoria, en contra del sentido común, que la velocidad de las bolas de luz (o de sus impulsos) aumentaba al hacerse el medio más denso.

ejemplos resueltos

Ejemplo 1

Cuando el rayo monocromo rojo ($n = 1,33$) incide con un ángulo de $i = 30^\circ$ sobre una lámina plano-paralela de espesor $e = 4 \text{ cm}$, éste sufre dos reflexiones (no las indicamos la segunda por simplificar el gráfico) y dos refracciones sucesivas de modo que a su salida emerge en una dirección paralela a la primera y espaciada una distancia d . Se pide su cálculo a partir de los datos iniciales i , n y h

Solución

Aplicando la ley de Snell:

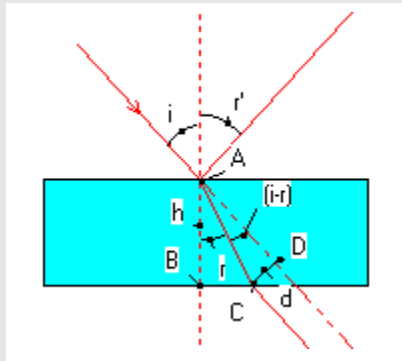
$$n_1 \sin i = n_2 \sin r \Rightarrow i = 22^\circ$$

De los triángulos ABC y ACD, obtenemos las relaciones:

$$\cos r = AB/AC \Rightarrow AC = 18 \text{ cm}$$

$$\sin(i-r) = \sin(30^\circ - 22^\circ) = \sin 8^\circ \Rightarrow \sin 8^\circ = 0,14 = CD/CA \Rightarrow CD = e = 2,5 \text{ cm}$$

fig 1.30



El ángulo límite:

Cuando el rayo incidente procede de un medio de mayor índice, como es el caso de agua aire, la energía del rayo que llega se reparte entre el rayo reflejado y el incidente en distinta proporción. Según va aumentando el ángulo de incidencia i , el rayo refractado se va acercando a la tangente a la superficie, haciéndose cada vez más tenue y el reflejado se intensifica. Para un valor crítico de $i = \phi$ ya no se observa el reflejado.

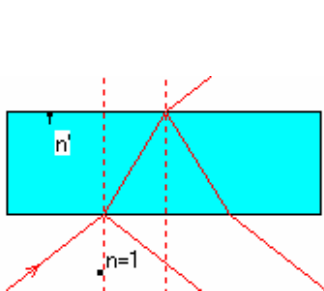


fig 1.31

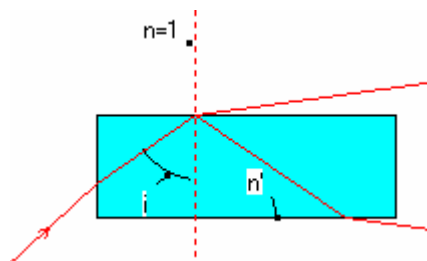
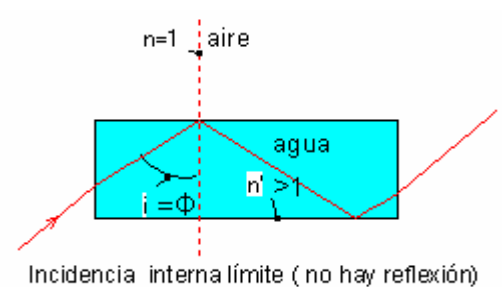


fig 1.32



Incidencia interna límite (no hay reflexión)

fig 1.33

Como en esta situación, el ángulo de refracción virtual sería de 90° , aplicando la ley de Snell entre el agua y el aire:

$$n_2 \sin \Phi = 1 \sin 90$$

$$\sin \Phi_L = 1/n$$

Esta propiedad es la clave de funcionamiento de las fibras ópticas sin las cuales las comunicaciones o las técnicas de introspección quirúrgica no habrían llegado a su estado actual. Una fibra óptica no es más que un hilo de vidrio cuya sección se va haciendo menos densa desde el centro a la superficie, de modo que cualquier rayo de luz que se hace llegar por el extremo de la fibra, rebota constantemente dentro de ella con ángulos de incidencia mayores al límite, con lo que se consigue que cualquiera que sea la curvatura de la fibra, la señal luminosa llegue al otro extremo con pérdidas mínimas.

La dispersión de la luz

Se comprueba que al incidir la luz de punteros laser de colores rojo y verde sobre un recipiente con agua, que el ángulo de refracción de la luz al cambiar de medio, es mayor para el rojo y con él, el índice de refracción. Si el haz es de luz blanca, aparece a la salida un haz divergente de luz con todos los colores del espectro, habiéndose convenido en llamar **dispersión** de la luz a este fenómeno.

Se concluye de ello que el índice de refracción de un medio depende tanto de la naturaleza del medio como de la radiación de la luz que incide sobre él. La ley de Snell se debe aplicar por ello de modo distinto para cada color.

La justificación al fenómeno que trataremos más adelante, hay que buscarla en el modelo ondulatorio de la luz.

El ángulo de desviación mínima en Prismas

Los prismas de vidrio eran en tiempos de Newton poco más que juguetes de feria, pero hoy, el desarrollo de la Óptica los ha hecho imprescindibles para el análisis de los colores, la fotografía, o a veces el uso de lentes para mejorar la visión. Dependiendo de la naturaleza de su vidrio, su poder de dispersión cambia por ejemplo de un vidrio Crown a otro mucho menor en otro Flint.

En general, cuando los rayos procedentes de un objeto inciden según un ángulo arbitrario sobre una de las caras, la imagen que se forma será mayor o menor, según vemos en un sencillo esquema. Existe in embargo una dirección que llamaremos ángulo de mínima desviación, δ , formado por la dirección del rayo incidente JC con el de salida, CT, en la que el ángulo del rayo incidente con la normal a la superficie, es el mismo que el refractado a la salida de la segunda superficie, luego si los rayos del objeto llegan según este ángulo, la imagen a la salida será del mismo tamaño que el objeto. Por su interés, veamos cómo se obtiene:

Aplicando el principio de reversibilidad de los rayos, si $\Phi_1 \neq \Phi_2$ habría dos ángulos distintos, y puesto que ello no ocurre, hay que admitir la citada igualdad. Aplicando pues esta simetría,

$$\Phi_1 = \Phi_2 \text{ y } \Phi'_1 = \Phi'_2$$

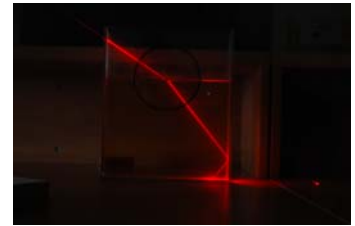


fig 1.34 Un rayo de luz roja procedente de un laser, atraviesa una cubeta en cuyo interior hay humo y agua teñida con gotas de naranja de metilo que difunden la luz. Al llegar al agua el rayo se refracta y vemos su trayectoria por la difusión en el humo y agua. Al chocar en el interior con la pared, se refleja según el ángulo límite.

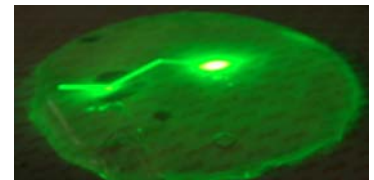


fig 1.35 Un rayo laser de color verde rebota dentro de una lente de gelatina según el ángulo límite hasta que encuentra una discontinuidad.

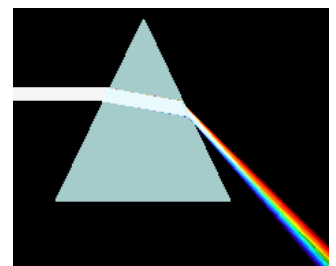
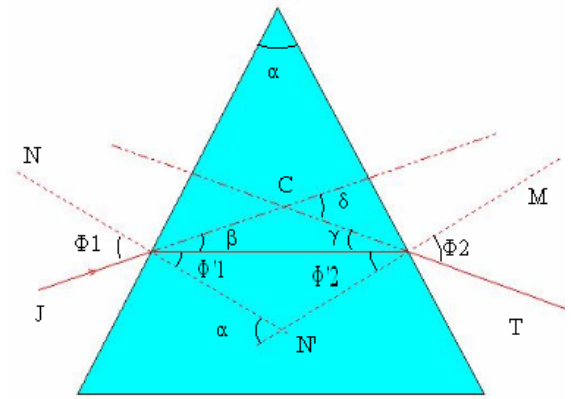


fig 1.36 Un rayo de luz blanca se dispersa en los colores del espectro al llegar al prisma

Del triángulo ABC obtenemos $\delta = \beta + \gamma = 2\beta$

En AB N' $\alpha = \Phi'_1 + \Phi'_2 = 2\Phi'_1$

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \Phi'_1 + \beta \\ \Phi'_1 &= \frac{1}{2}\alpha \\ \Phi_1 &= \frac{1}{2}(\alpha + \delta)\end{aligned}$$



fig# 1.37

Y de la aplicación de la ley de Snell se deduce una propiedad muy útil para medir índices de refracción de distintos rayos. Como

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \frac{1}{2}(\alpha + \delta)}{\sin \frac{1}{2}\alpha}$$

Basta con medir el ángulo del prisma α y el de desviación δ para calcular los índices relativos.

El dioptrio esférico

En el caso de que el rayo incidente penetre en un medio de índice de refracción distinto, es sabido que se desvía formando un ángulo r con la normal. Supondremos de nuevo que los rayos llegan en una zona paraxial. Si la superficie es esférica y C es su centro de curvatura, la imagen del punto se localizará en P' de acuerdo con la ley de Snell:

$$n \sin i = n' \sin r \Rightarrow n i \approx n' r$$

Aplicando la conocida relación entre los ángulos de los triángulos

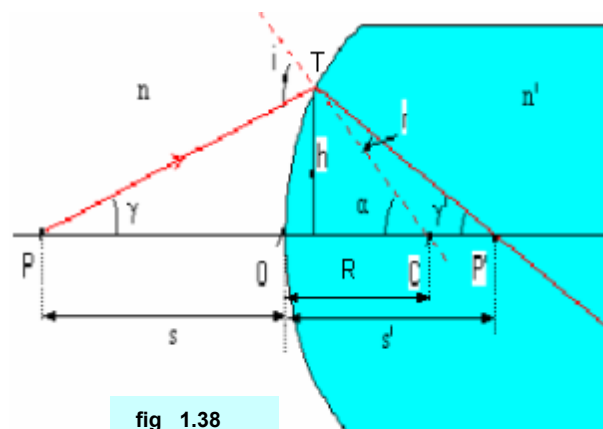


fig 1.38

$$\begin{aligned}\gamma + \alpha &= i \\ \gamma' + r &= \alpha \Rightarrow r = \alpha - \gamma' \\ n(\gamma + \alpha) &= n'(\alpha - \gamma')\end{aligned}$$

y aplicando de nuevo la condición paraxial, los ángulos se pueden aproximar a las tangentes

$$\begin{aligned} \gamma + \alpha &= i \\ \gamma' + r &= \alpha \Rightarrow r = \alpha - \gamma' \\ \alpha &\approx \tan \alpha = h/R & \gamma &\approx \tan \gamma = -h/s & \gamma' &\approx \tan \gamma' = h/s' \\ n(-h/s + h/R) &= n'(h/R - h/s') \\ (nh/s - n'h/s') &= (n - n')h/R \Rightarrow & n'/s' - n/s &= (n' - n)/R \end{aligned}$$

que se enuncia como la conocida **ley de Gauss**. Veamos ahora dos posiciones particulares:

- Si el objeto se sitúa en el infinito, $s = \infty$ y queda:

$$\begin{aligned} n'/s' &= (n' - n)/R \Rightarrow \\ f' &= n'R/(n' - n) \end{aligned}$$

A la distancia f' obtenida, se le llama **distancia focal imagen** del dioptrio

- Si la imagen procede de una posición s al que el rayo emerge paralelo, la posición de la imagen estaría en el infinito, $s' = \infty$. La fórmula del dioptrio quedaría:

$$\begin{aligned} -n/s &= -n'/f = (n' - n)/R \Rightarrow \\ f &= -nR/(n' - n) \end{aligned}$$

A la distancia f obtenida, se le llama **distancia focal objeto** del dioptrio.

LAS LENTES DELGADAS

Una lente es un dispositivo que refracta los rayos según esta ley y los hace converger o diverger de su dirección inicial. Para el cálculo de las relaciones entre distancias focales, distancias del objeto y la imagen al centro óptico, consideramos una lente como la unión de dos dioptrios esféricos de radios R_1 y R_2 : en el primero los índices son n (de valor unidad para el aire) y en el segundo n' . En el caso más general, una lente tiene cierto espesor y el problema de cálculo es complejo. No obstante, en la práctica son muy frecuente las lentes delgadas y ello permite simplificaciones aceptables del proceso.

Una lente **convergente**, por su geometría y su índice de refracción, es un sistema que desvía hacia el eje óptico los rayos que inciden sobre ella. (Nótese en la figura que cuando los rayos exceden de la zona paraxial sus refracciones ya no están en el foco imagen).

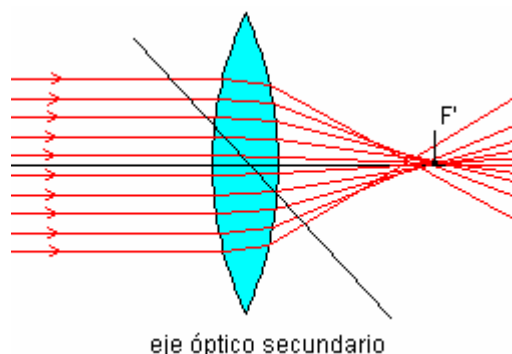


fig 1.39

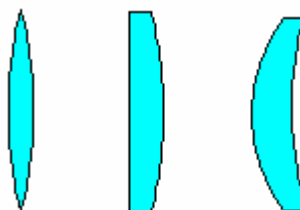


fig 1.40

Una lente **divergente**, debido a su curvatura e índice, abre la trayectoria de los haces de luz que llegan a ella. Según el fin, se hacen distintos diseños de ellas.

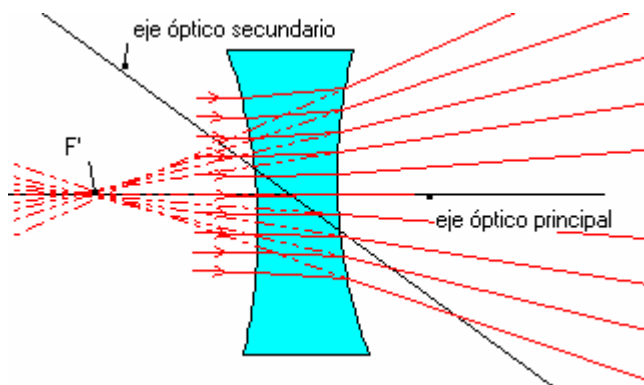


fig 1.41

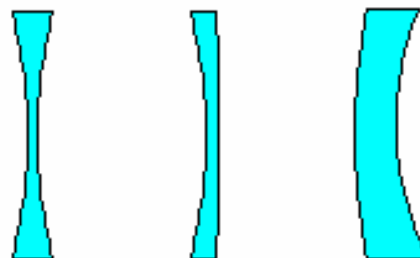


fig 1.42

Existen también las lentes *cilíndricas* (positivas y negativas) cuyo uso, como veremos, está prácticamente restringido a la corrección del astigmatismo. Permiten converger los rayos que vienen en determinado plano dejando inalterados los rayos que vienen en otro perpendicular.

La investigación en este campo mediante programas informáticos que optimizan la marcha de cada rayo, ha dado lugar a las lentes *asféricas* (no esféricas) y a las *progresivas* (de curvatura variable). Reducen peso de la lente y las aberraciones que dificultan la nitidez de la imagen.

Se conocen como **plano focal objeto** y **plano focal imagen** a los planos perpendiculares al eje óptico que pasan por el foco objeto e imagen. **Foco imagen** de una lente convergente es un punto del espacio imagen, situado a la derecha de la lente, al que convergen los rayos que llegan paralelos al eje óptico. Si la lente diverge, su foco imagen es el punto, situado a la izquierda de la lente, al que convergen las prolongaciones de los rayos que han sido refractados tras una incidencia paralela.

Foco objeto de la lente convergente es el punto del espacio objeto en el que al colocar un foco puntual que emite un haz cónico, los rayos refractados emergen paralelos. Si la lente diverge, el foco objeto se sitúa a la derecha de la lente. Verifica que si las prolongaciones de un haz cónico convergen hacia él, el haz se convierte en paralelo.

Se llama **eje óptico secundario** de una lente a cualquier línea oblicua que pase por su centro óptico. Se define **potencia** de la lente a la razón inversa de la distancia focal imagen. Informa de la convergencia de la lente. Se mide en **dioptrías** tanto positivas (lentes convergentes) como negativas (divergentes)

$$P = 1/f'$$

Las fórmulas de las lentes

Centrándonos en el estudio de estas últimas, observamos que los rayos que salen del objeto P situado en una situación cualquiera del eje óptico, experimentan dos refracciones sucesivas en las superficies de la lente de radios R_1 y R_2 . En la primera, aunque los rayos diverjan, sus prolongaciones hacia atrás las que convergen hacia P'

En la segunda, los rayos convergen finalmente hacia P' formando la imagen de P. Por tanto podemos situar la posición final de la imagen en dos etapas: localizando en primer lugar la de P'' aplicamos la ley de Gauss a la trayectoria del rayo mediante el algoritmo de Gauss, y a continuación, considerar P'' como un nuevo objeto que tras



fig 1.43 La botella hace de lente cilíndrica en la zona donde hay agua. Nótese que sólo aumenta las imágenes en una dirección

su refracción en la segunda superficie durante su viaje por el medio 2, llega a la posición P' obtenida aplicando de nuevo el mencionado algoritmo. En efecto:

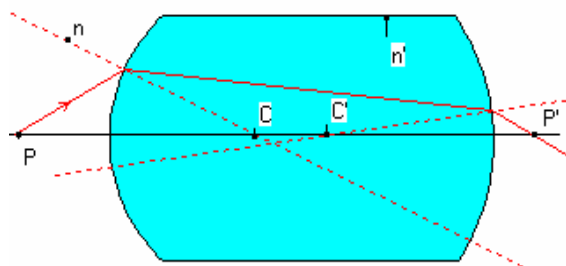


fig 1.44

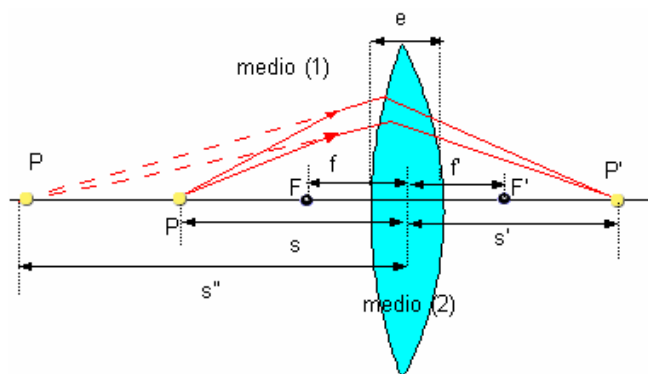


fig 1.45

En la primera refracción:

$$n/s'' - 1/s = (n-1)/R_1$$

En la segunda:

$$1/s' - n/s'' = (1-n)/R_2 = - (n-1)/R_2$$

Al ser las lentes delgadas (el espesor es despreciable), la distancia de s'' de la imagen P'' de P según la superficie primera, coincide con la distancia de P'' a la superficie de la segunda lente. Podemos aproximar que $s''_1 = s''_2 = s''$

Sumadas las dos ecuaciones con la aproximación mencionada, dan:

$$1/s' - 1/s = (n-1) (1/R_1 - 1/R_2)$$

Esta expresión, denominada **fórmula del constructor de lentes delgadas** , es la base de la mayoría de los diseños ópticos .

Si definimos el foco objeto **F** con la condición de que la **distancia focal objeto, f** verifique:

$$\begin{aligned} s' = \infty &\Rightarrow s = f \Rightarrow 1/f - 1/f = (n-1) (1/R_1 - 1/R_2) \Rightarrow \\ 1/f &= (n-1) (1/R_1 - 1/R_2) \end{aligned}$$

Análogamente para el foco imagen **F'** y su **distancia focal imagen f'** :

$$\begin{aligned} s = \infty &\Rightarrow s' = f' \Rightarrow 1/f' - 1/\infty = (n-1) (1/R_1 - 1/R_2) \Rightarrow \\ 1/f' &= (n-1) (1/R_1 - 1/R_2) \end{aligned}$$

queda otra forma de esta ecuación, conocida como ecuación de las lentes en forma gaussiana

$$1/f' = 1/s' - 1/s = P$$

Con ella, los radios de ambas caras de la lente y el índice de refracción, es posible calcular la distancia focal imagen de la lente **f'**, y con ella la **potencia, P = 1/f'**. Esta nueva magnitud que se mide en **dioptrías** cuando f' se toma en metros, informa del

poder de convergencia de la lente (a menor distancia focal, los rayos convergen más y su potencia es mayor).

ejemplos resueltos

Ejemplo 1

Calcular la potencia de una lente equiconvexa de índice de refracción $n = 1,60$ y radios iguales a 8 cm.

Llevando a la fórmula del constructor de lentes los valores $R_1 = +0,080$ m y $R_2 = -0,080$ m, queda :

$$1/f = P = 1/s' - 1/s = (n-1) (1/R_1 - 1/R_2) = (1,60-1) [1/ 0,080 - 1 / (-0,080)] = + 1,50 \text{ Dp}$$

Ejemplo 2

Un objeto real de 2 cm de altura, se coloca : a) a 60 cm de una lente convergente de distancia focal 40 cm. b) a 20 cm de la misma. Determinar totalmente las imágenes resultantes.

a) La posición de la imagen:

Llevando a la fórmula de las lentes los valores: $y = 2$ cm , $s = -60$ cm , $f = +40$ cm

$$1/f = 1/s' - 1/s \Rightarrow 1/40 = 1/s' - (1/-60) \Rightarrow s' = +120 \text{ cm}$$

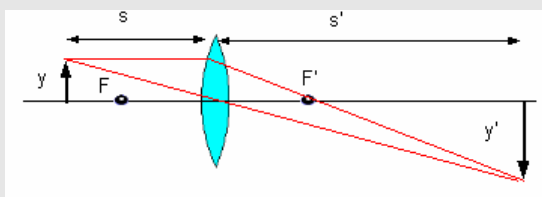
La imagen es real y está situada a 120 cm del eje óptico.

Tamaño y sentido de la imagen:

De la fórmula del aumento lateral:

$$A = y'/y = +120/-60 = -2$$

La imagen (fig. 1.46) será invertida y de tamaño doble que el objeto; su altura es : $y' = (-2) (+2) = -4$ cm



b) Ahora $y = 2$ cm, $s = -20$ cm, $f = +40$ cm $\Rightarrow 1/40 = 1/s' - 1/-20 \Rightarrow s' = -40$.

El aumento lateral

$$A = y'/y = s'/s = -40/-20 = +2$$

El tamaño:

$$y' = A \cdot y = (+2) (+2) = +4$$

La imagen está en el espacio objeto a 40 cm a la izquierda del centro, virtual, derecha y mayor que el objeto.

La fórmula de Newton

Otra forma de esta expresión es la fórmula de Newton que se deriva de la semejanza de triángulos QPO y Q'P'O.

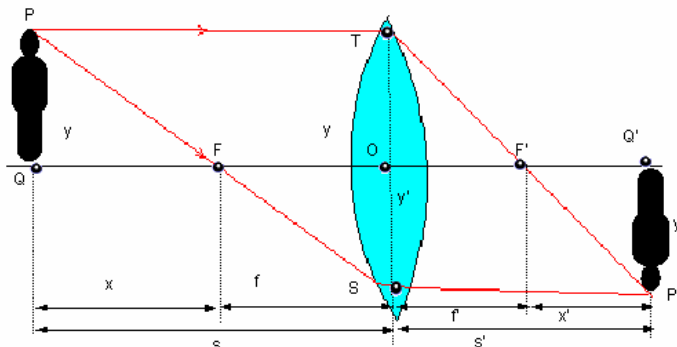


fig 1.47

De la pareja de triángulos QPF y OFS por un lado y la pareja OTF' y Q'F'P', por otra, se deduce que

$$y/x = y'/f \quad y, \text{ además, } y/f = -y'/x'$$

Multiplicando ambas ecuaciones queda la conocida expresión de Newton:

$$xx' = -f^2$$

Formación de imágenes en lentes convergentes

La primera lente de la que se tiene registro gráfico es de un pintor medieval que dibuja a un monje presbita en la lectura de sus códices. Una lente convergente dará una imagen nítida (enfocada) cuando exista una correspondencia punto a punto entre el objeto y la imagen. La construcción de imágenes en las lentes sigue tres principios comunes:

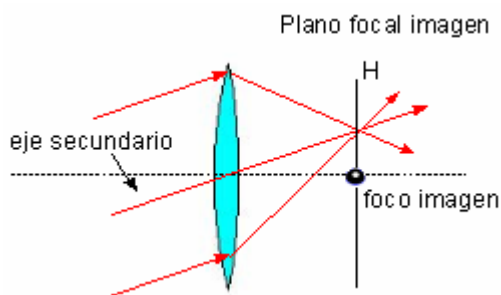


fig 1.48

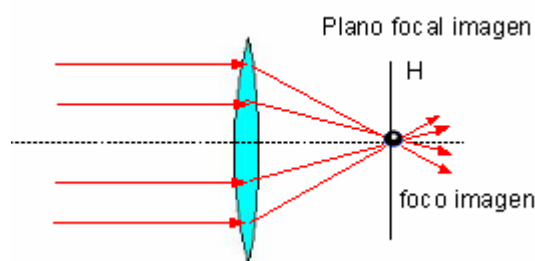


fig 1.49

Puede formar imágenes **reales** de un objeto cuando en el otro lado de la lente se pueden recoger en una pantalla rayos enfocados procedentes de cada punto del objeto. Las imágenes son **virtuales** cuando no se pueden recoger en ella porque los rayos procedentes de cada punto, salen de la lente formando un haz divergente. Un observador situado al otro lado, interpreta que el haz de rayos procede de un punto concreto del objeto. Curiosamente las imágenes así vistas son más luminosas

que a ojo desnudo, pues recogen en la retina un haz de luz más ancho que a ojo desnudo. Las lentes convergentes más comunes son las lupas, curvadas por ambos lados (de uso para relojeros y joyeros, como cuentahílos, como colimador de haces de luz paralelos, etc.). No obstante existen diseños plano-convexos (utilizadas en objetivos fotográficos, retroproyectores, ...) o con menisco convergente (utilizadas en la construcción de gafas para présbitas por su menor peso). Rayos paralelos al eje principal emergen con sus prolongaciones convergentes en el foco imagen.

Rayos convergentes hacia el foco objeto emergen paralelos al eje principal

Rayos convergentes hacia un punto del plano focal, salen paralelos entre sí. El corte de la prolongación de un rayo concreto en el plano focal objeto, sirve para dibujar el rayo secundario auxiliar que pasa por la intersección, y a partir de ahí dibujar la prolongación paralela a dicho rayo auxiliar

- Un rayo que llega paralelo al eje óptico se desvía pasando por el foco imagen, F' , situado a la mitad del radio.
- Un rayo que emerge del foco objeto, F , sale de la lente paralelamente al eje óptico.
- Un rayo que pasa por el centro óptico, atraviesa la lente sin desviarse.
- Un rayo que incide paralelamente a un eje secundario se refracta de modo que sus intersecciones coincidan en el plano focal objeto.

La imagen de un cuerpo extenso, supuesto de dimensión vertical y situado en el eje óptico, se hace a partir de la representación de sus límites extremos. La intersección de dos rayos cualesquiera emitidos por el superior, dará el punto superior de la imagen. Para el inferior no hace falta pues la base de la imagen estará en el eje.

De los principios anteriores se deduce que se pueden utilizar dos métodos: cuando el tamaño del objeto es comparable con el diámetro de la lente (lupa, microscopio,...) es preferible el de rayos paralelos al eje óptico (aunque también sea válido el de rayos oblicuos). Cuando el tamaño es mucho mayor, lo que sucede para observaciones con telescopio, se utilizan los rayos oblicuos.

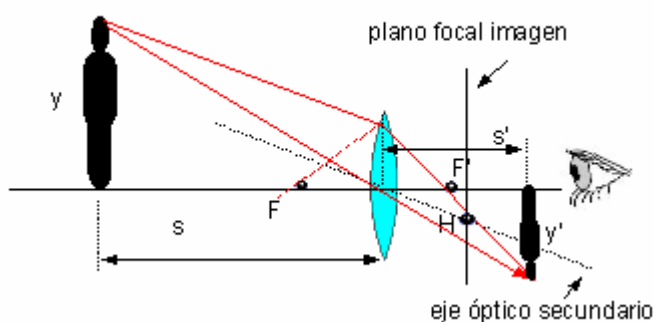


fig 1.50

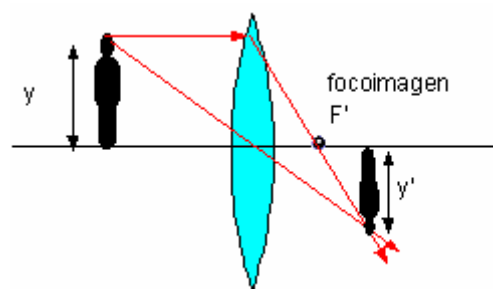


fig 1.51

Según que el, entre el centro de curvatura C y el foco objeto F o entre el foco y la lente, se obtienen respectivamente varios casos:

- Objeto se encuentre entre infinito y C : imagen menor, inversa y real.
- Objeto en el centro de curvatura C : Imagen de igual tamaño, inversa y real.
- Objeto entre C y F : imagen mayor, inversa y real.
- Objeto en F : no hay imagen nítida(los rayos van al infinito)
- Objeto entre C y el centro óptico O : imagen mayor, directa y virtual.

Si en lugar de un objeto real, tenemos un haz de rayos que converge hacia un punto del espacio imagen, lo podemos considerar como un objeto virtual y que produce una imagen y' .

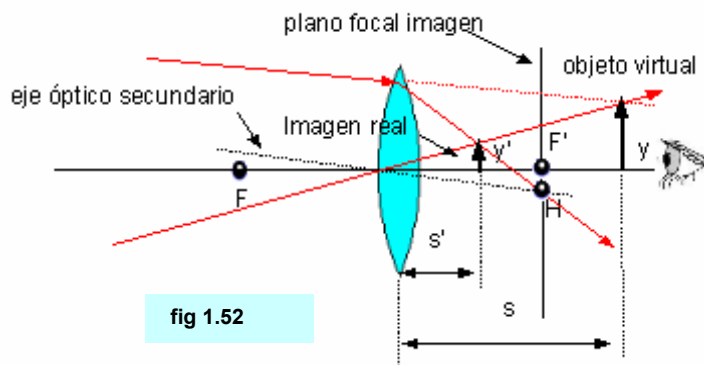


fig 1.52

Aumento de una lupa

En el caso de que el objeto esté a una distancia de la lente más corta que su distancia focal, se dice que tenemos una **lupa**. La empleamos para aumentar la imagen del objeto.

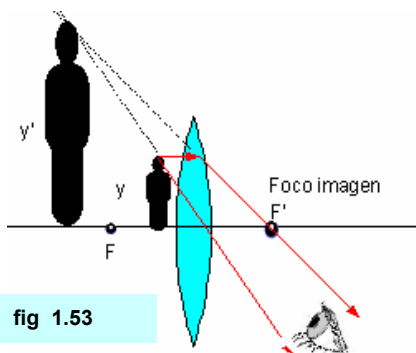


fig 1.53

Esta visión viene condicionada por la flexibilidad del cristalino que en un ojo normal adulto permite una visión nítida de los objetos y sin fatiga durante un tiempo largo sólo si la distancia es mayor de 25 cm. Lo ideal es que los rayos procedentes de un mismo punto del objeto lleguen al ojo casi paralelos, lo que sucede a una distancia de cinco ó seis metros.

Para tener una referencia del aumento de la lupa, definimos el aumento lateral de cualquier sistema amplificador como el cociente de las tangentes del ángulo ω' bajo el que se ve la imagen ampliada entre la del que se ve sin ampliar ω y comparamos ambas razones:

$$A = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega$$

Es evidente que el aumento dependerá de la posición del objeto, por lo que a fin de eliminar esta posibilidad, las lupas comerciales eligen para la observación a ojo desnudo del objeto una distancia fija, la del punto próximo, y para la observación del mismo a través de la lupa, el foco objeto de ésta.

El objeto de altura y se ve nítido a los 25 cm. Si el mismo objeto se sitúa en el plano focal de la lupa, los rayos que llegan al observador Dado que los ángulos varían según las posiciones, fijaremos ω' situando el objeto. $\omega\omega\omega\omega\omega$ El montaje estándar

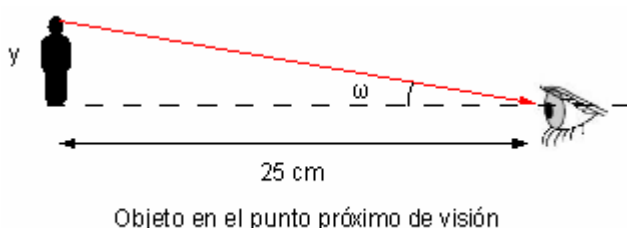


fig 1.56

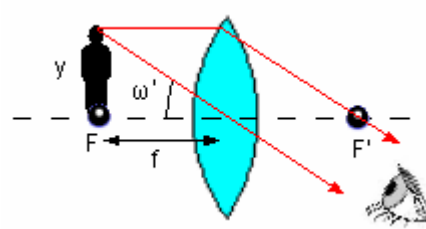


fig 1.57



fig 1.54

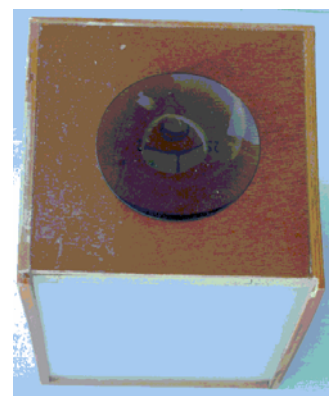


fig 1.55. Las imágenes virtuales de objetos muy próximos a la lente, observadas por lentes convergentes, se observan directas y mayores que el objeto.

Aplicando la definición de aumento visual:

$$A = \tan \omega' / \tan \omega = (y/f) / (y/25) = 25 / f$$

Según esto, una lupa cuenta hilos como las que usan los filatélicos de 5cm de distancia focal tendrá $25/5 = 5$ aumentos.

En la experiencia de la figura, una vela se mantiene una a la distancia fija de 60 cm de una pantalla. Si una lupa de distancia focal 10 cm, se mueve entre ambos elementos, se encuentran dos posiciones en las que la vela enfoca con nitidez.

fig 1.58



Consigue una lupa económica en un bazar y repite la experiencia en tu casa. Debes:

- Medir las distancias entre la lupa y la vela y la lupa con la pantalla. Medir después los tamaños de la llama de la vela y de sus imágenes.
- Calcula teóricamente las dos posiciones de la lupa.
- Calcula el cociente entre los tamaños de la llama y compáralos con los medidos.
- Dibujar el diagrama de las dos posiciones.
- Justifica las dos pequeñas imágenes directa e invertida que se ven en la lupa.

(Este procedimiento es el método de Abbe para medir distancias focales desconocidas de una lente)

Formación de imágenes en lentes divergentes

En estas lentes son elementos de especial interés:

- el foco imagen F' : el punto del que parece que emanan los rayos que llegan paralelos al eje óptico
- el foco objeto F : verifica la propiedad de que los rayos que inciden convergiendo hacia él, salen paralelos al eje óptico.
- Los planos focales objeto e imagen: pasan por los puntos homónimos y son perpendiculares al eje óptico principal.

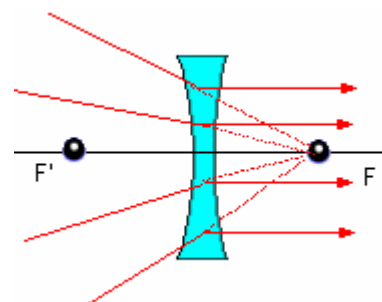


fig 1.59

- Un rayo cuya prolongación pasa por el foco imagen F' , emerge paralelo al eje óptico.
- Un rayo que pasa por el centro óptico, emerge sin desviarse de su dirección inicial.
- Un rayo paralelo al eje óptico emerge en otro cuya prolongación hacia atrás pasa por el foco imagen
- Un rayo paralelo a un eje secundario, emerge en una dirección tal que su prolongación hacia atrás corte al plano focal imagen en el mismo punto que dicho eje.

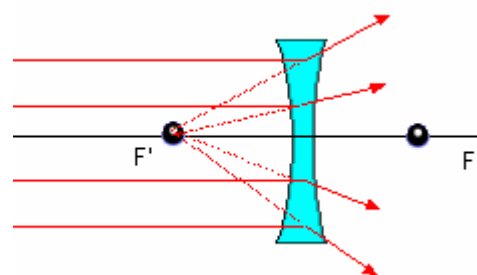


fig 1.60

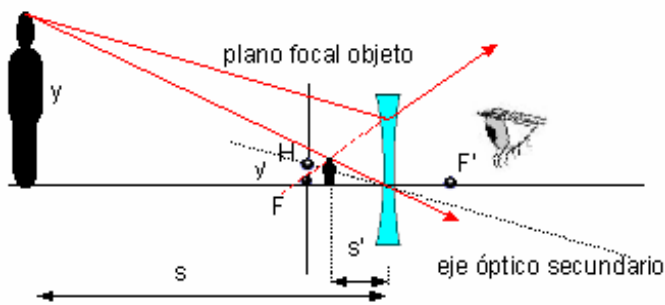


fig 1.61

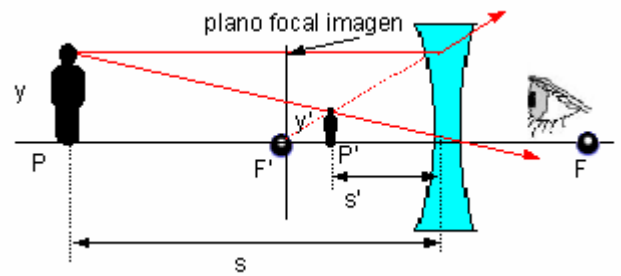


fig 1.62

Si a la derecha de la lente convergen las prolongaciones de rayos interceptados por ésta, se forma un objeto virtual cuya imagen y' se construye con la fórmula de las lentes de Gauss y/o con el método del rayo oblicuo.

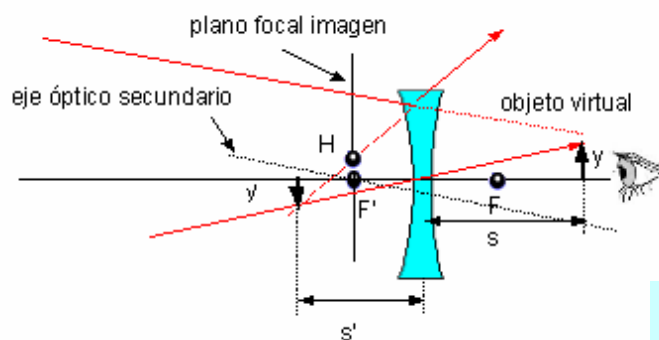


fig 1.63

Ejemplo 1

Determinar la imagen que da una lente divergente de una distancia focal 20 cm de un objeto virtual de 4 cm de altura situado a 10 cm del centro óptico.

- Si tenemos la precaución del signo positivo para la posición del objeto virtual, $1/f' = 1/s' - 1/s \Rightarrow 1/s' - 1/(-10) = 1/(-20) \Rightarrow s' = 20 \text{ cm}$
- De la definición de aumento $A = y'/y = s'/s \Rightarrow A = 20/(+10) = 2$. La imagen será directa y a la derecha de la lente.
- El tamaño de la imagen será : $4 \times 2 = 8 \text{ cm}$

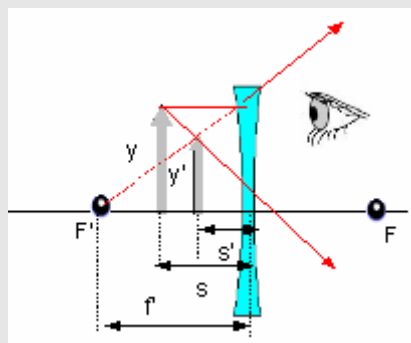


fig 1.64

Construcción de imágenes en sistemas con lentes combinadas

Las aplicaciones más importantes de la óptica de rayos son los montajes sucesivos de lentes que consiguen imágenes más precisas y aumentadas. Para la obtención de la imagen final, podemos considerar que las prolongaciones de los rayos refractados tras la primera lente (o sus prolongaciones), hacen de objeto para la siguiente, que a su vez la refracta de nuevo. En la gráfica, P'' que es la imagen virtual de P debida a L_1 , se transforma en objeto real para L_2 que obtiene la imagen final P' . Para su construcción, podemos seguir tanto el método gráfico como la aplicación de las fórmulas de las lentes.

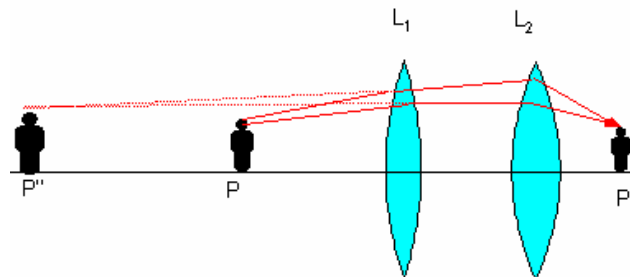


fig # 1.65

Aunque gráficamente la construcción de las imágenes sucesivas sigue el algoritmo del rayo oblicuo ya visto, el cálculo analítico necesita su ejemplificación.

Veamos el montaje dos lentes convergentes sucesivas separadas una distancia d . El añadir la lente L_2 consigue aumentar la convergencia de L_1 con lo que se incrementa la potencia del sistema global.

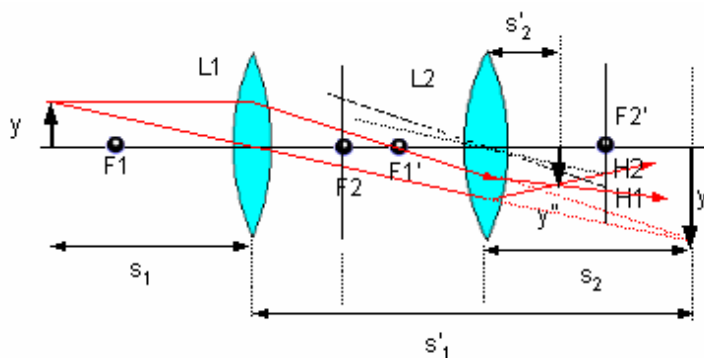


fig 1.66

Si tenemos dos lentes de potencias P_1 y P_2 en contacto directo, es fácil demostrar que la potencia total del conjunto (con sus signos algebraicos) es :

$$P = P_1 + P_2$$

Si están separadas están separadas una distancia d , es más complejo llegar a que la potencia total del conjunto es:

$$P = P_1 + P_2 - d / f_1' f_2'$$

Ejemplo:

En el ejemplo de la figura anterior, un objeto de altura y se coloca delante del sistema formado por las lentes convergentes L_1 y L_2 de distancias focales imagen $f_1 = +3$ cm y $f_2 = +4$ cm respectivamente. Si la distancia entre las lentes es de 2 cm y el objeto está situado a 4 cm de la primera lente, calcular la posición final de la imagen final.

Analíticamente:

Aplicando la fórmula de Gauss, determinamos la posición de la imagen del objeto y tras su paso por L_1 :

$$1/f_1 = 1/s_1' - 1/s_1 \Rightarrow 1/3 = (1/s_1') - [1/(-4)] \Rightarrow s_1' = +12 \text{ cm}$$

Esta imagen y' es real, situada 12 cm a la derecha de L_1 . Al colocar en el camino de los rayos la lente L_2 , es evidente que y' desaparece de su posición, pero como la convergencia de los rayos anteriores no ha cambiado, la nueva refracción se calcula como si en esa misma posición existiera un objeto virtual de iguales dimensiones.

El nuevo objeto para L_2 está situado a + 10 cm de ella, dada la separación de 2 cm entre las lentes.

Aplicando la misma fórmula podemos calcular la distancia de la imagen y'' a la lente:

$$1/f_2 = 1/s_2' - 1/s_2 \Rightarrow 1/4 = 1/s_2' - [1/(+10)] \Rightarrow s_2' = +2,86 \text{ cm}$$

Gráficamente:

Para la construcción de la imagen que da L_1 del objeto Y es más sencillo el uso del método de los rayos paralelos que nos da la imagen y' de la figura.

Sin embargo este método ya no es aplicable para la segunda lente pues la incidencia de los rayos es ahora oblicua pero podemos aplicar el método del rayo oblicuo:

los ejes secundarios paralelos a ambos rayos, cortan al plano focal imagen que pasa por F_2 en las posiciones H_1 y H_2 . Por ellas pasan los nuevos rayos refractados en L_2 y su intersección nos da la posición de la nueva imagen y''

LOS INSTRUMENTOS ÓPTICOS

Los telescopios y microscopios nacen en occidente con un constructor de lentes, Antoni van Leeuwenhoek, que por azar descubrió las posibilidades de aumentar imágenes lejanas colocando dos lentes sucesivamente. Su evolución constituye un ejemplo de cómo la ciencia puede interaccionar con la tecnología cuando se dispone de aparatos precisos y de la intuición para saber aplicarlos. El Universo, antes estático y armónico se convierte en un lugar sometido a cambios y a leyes hasta entonces desconocidas gracias a las observaciones de los telescopios de Galileo y Kepler.

Estos dispositivos tienen un objetivo que recoge la imagen y un ocular por el que ésta se observa. Interesa que el primero sea ancho para recoger la máxima cantidad de luz, y el segundo pequeño, pues el haz de salida debe ser comparable al diámetro de la pupila del observador. Veamos los más representativos. Es Descartes, con su ley de Snell mejorada, el que aplica su fórmula de las lentes al diseño de telescopios con proyecto previo y consigue mejoras considerables seguidas por Huygens y Newton.

El telescopio de Galileo

Cuando Galileo, que no conocía aún las leyes de la refracción, tuvo conocimiento del invento holandés, construyó uno mejor por métodos empíricos. Su contacto en Venecia con los maestros cristaleros de Murano le ayudó en la elección y el tallado de cristales y obtuvo unos aceptables treinta aumentos con los que observó los cráteres de la Luna, las fases de Venus y los cuatro satélites de Júpiter. Montado con una lente convergente de poca potencia como objetivo y una divergente como ocular, su

uso fue al principio como objeto lúdico pero cuando Galileo lo enfoca al cielo se convierte en la herramienta del nuevo paradigma.

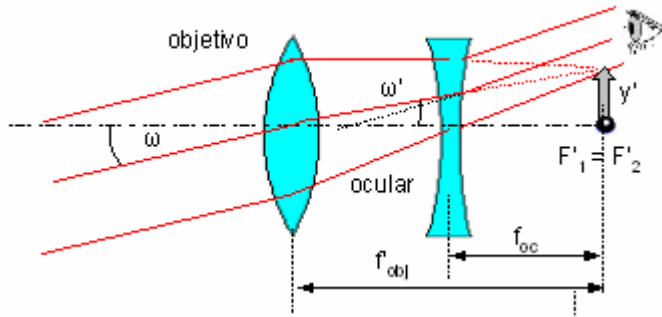


fig. 1.67 Telescopio de Galileo

Como la observación es siempre en el infinito, se hace coincidir la distancia focal imagen del objetivo con la objeto del ocular, lo que garantiza que los rayos salgan paralelos. La imagen se ve derecha, situada en el infinito y formando un ángulo mayor ω' con el eje óptico que el de los rayos originales ω . Puesto que los rayos no convergen en un punto, en lugar del aumento lateral, es más útil definir un **aumento visual** como:

$$M = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega = -f_{\text{ob}} / f_{\text{oc}}$$

El telescopio astronómico de Kepler

Cuando Kepler sabe de la teoría heliocéntrica de Galileo, se adscribe a ella de inmediato. Pronto se inicia entre ellos una correspondencia con un refuerzo mutuo en sus tesis heliocéntricas. Kepler había trabajado los temas de visión y óptica de rayos, diseña su propio telescopio para observación de los astros. Pensado exclusivamente para la observación de astros, la imagen se ve en el infinito y derecha

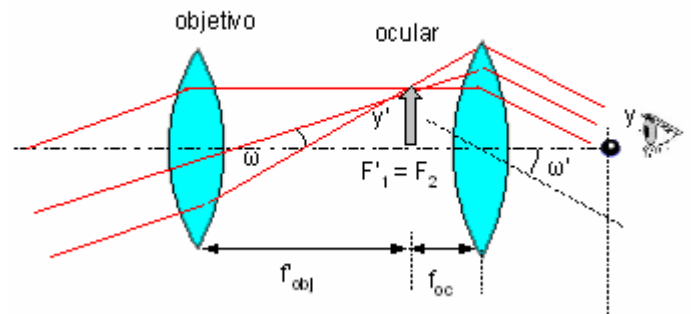


fig 1.68 Telescopio astronómico

Su aumento visual será:

$$M = \text{tg } \omega' / \text{tg } \omega = -f_{\text{ob}} / f_{\text{oc}}$$

Luego si queremos grandes aumentos, será a costa de objetivos con distancias focales muy grandes puesto que la dificultad técnica de los oculares impide focales menores de 20 mm.

El microscopio óptico

Un microscopio óptico consta básicamente de un objetivo muy convergente, del orden de algunos milímetros y un ocular del orden de algunos centímetros. Ambos elementos, distanciados unos 15 o 20 cm se centran sobre un eje común a fin de que la imagen del objeto que da el objeto sea real y dentro de la distancia focal del ocular. Con ello se consigue una primera imagen real e invertida, y'_1 , mayor que el objeto, y ,

que a su vez hace de objeto para la segunda lente. Tras la segunda refracción se obtiene la imagen, y'_2 , virtual, invertida y mayor que y'_1 .

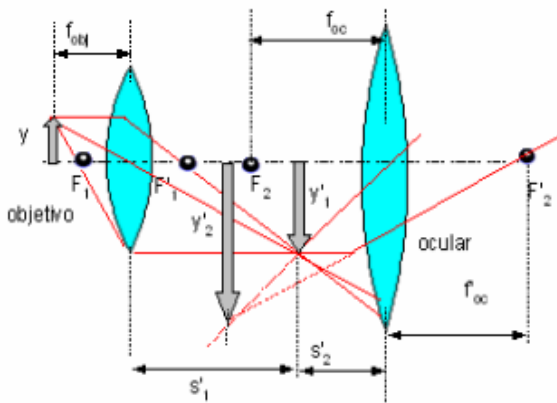


fig 1.69

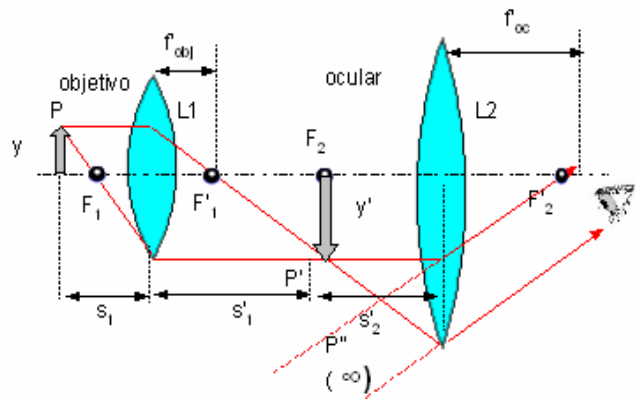


fig 1.70

A fin de que la visión sea nítida, la imagen debe final debe situarse ente el punto próximo (15 cm para un sujeto joven) y el punto remoto (el infinito del observador), lo que condiciona la longitud estándar de los telescopios en unos 16 cm. Pequeñas variaciones en la profundidad del objeto dan grandes variaciones en la posición de las imágenes por lo que sólo serán visibles los objetos situados en un intervalo de profundidad muy débil y la observación sólo se observa nítidamente un plano de la muestra. Para observar otro punto, hay que desplazar todo el bloque del microscopio mediante un tornillo micrométrico.

El manejo de un microscopio requiere unas instrucciones previas: para el enfoque de la muestra se desplaza todo el bloque con una **cremallera** movida por un tornillo, hasta una distancia de la muestra del orden de milímetros, y una vez que se observa la imagen, se hace el ajuste fino con el **tornillo micrométrico**. Otra dificultad es que para aumentos grandes la intensidad luminosa baja considerablemente, por lo que es necesaria una iluminación suplementaria mediante una lamparita incorporada.

Se demuestra que el aumento comercial o número de aumentos del los microscopio es el cociente

$$N = 250 / f$$

Los usuales consiguen hasta los 1000 aumentos según la combinación de ocular y objetivo que se coloque. Por encima de ese valor la imagen gana en tamaño pero pierde definición. La moderna cirugía refractiva que corrige los defectos de la visión tallando la córnea o extirpando el cristalino.

ABERRACIONES ÓPTICAS

De la pregunta anterior podría pensarse que un instrumento óptico puede agrandar una imagen por pequeña que sea o lejana que esté, con lentes esféricas, pero desgraciadamente no ocurre así como comprueban los que compran telescopios o microscopios en las jugueterías.

Son varias las deformaciones que una lente da de la imagen llamadas *aberraciones* de las que sólo comentaremos las más representativas:

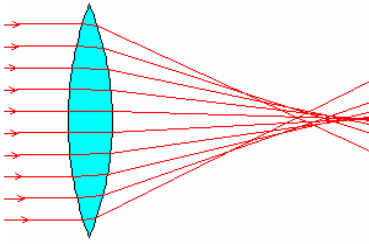


fig 1.71 Aberración esférica

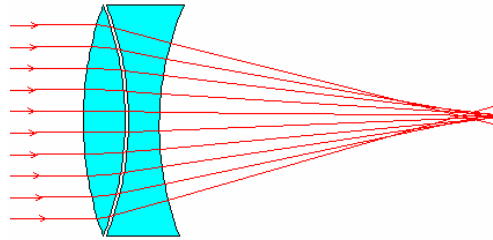


fig 1.72 Corrección de la aberración esférica

Las *aberraciones de esfericidad* se deben a la geometría de la lente. Las fórmulas obtenidas utilizaron la aproximación de la zona paraxial (muy estrecha para poder aproximar el ángulo al seno y la tangente) que deja de ser válida en los límites externos. Como consecuencia de ello, el foco puntual se convierte en una zona borrosa y la imagen deja de ser nítida. La forma de corregirlas es colocar otra lente divergente cementada con la anterior

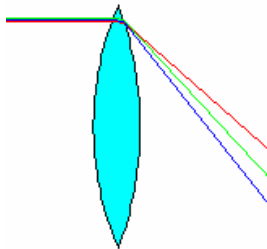


fig 1.73 Aberración cromática

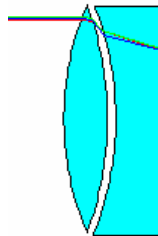


fig 1.74 Su corrección

Además de ellas, existe el hecho de que cada radiación luminosa se refracta con un ángulo distinto al incidir en la lente. Aún en zona paraxial, el foco de cada color se sitúa en un punto distinto y la imagen aparece con sus contornos en distintos colores. Este fenómeno, llamado *aberración cromática*, limitó gravemente la precisión de los telescopios iniciales por lo que Newton, pensando que este era un problema insoluble con telescopios refractores, decidió construir su famoso telescopio relector que eliminaba totalmente estas aberraciones (aunque no las esféricas). Más tarde, Gullastone conocedor de vidrios de distinto índice de refracción, diseñó el doblete cromático que las eliminaba satisfactoriamente colocando una lente divergente de índice de refracción mayor (vidrio Flint) cementada con la convergente (vidrio Crown) que reconducía de modo distinto los focos de los distintos colores hasta hacerlos coincidir en el mismo punto.

Otras aberraciones (coma, tonelete, astigmatismo,...) que exceden los límites de esta unidad necesitan nuevas lentes correctoras, nuevas geometrías de las lentes (**asféricas**) y software gráfico para optimizar la trayectoria de los rayos. Por este motivo, los objetivos de las cámaras fotográficas, telescopios, etc, tienen varias lentes distintas.

Lamentablemente, los instrumentos ópticos tienen otras limitaciones derivadas de la misma naturaleza ondulatoria de la luz que aquí no consideramos, que se hacen insolubles para la visión de objetos muy pequeños. Los nuevos microscopios (electrónico, efecto túnel, de fuerzas atómicas) consiguen definiciones hasta el nanómetro utilizando las propiedades cuánticas de los electrones. Con ellos se visualizan redes cristalinas y átomos individuales.

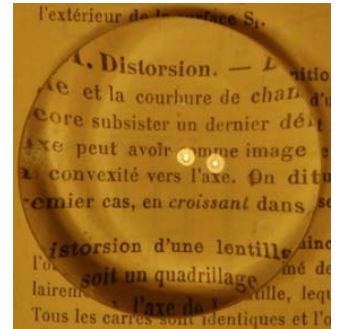


fig 1.75 La distorsión en corsé abre las líneas extremas de la imagen

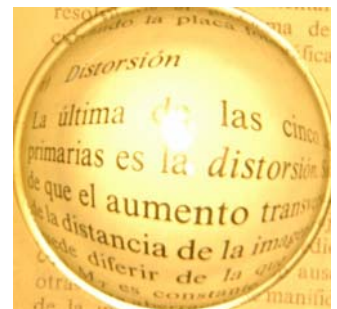


fig 1.76 La distorsión en barril cierra las líneas extremas de la imagen



El paradigma discordante:

El compatriota de Descartes, *Fermat*, fue el único matemático contemporáneo que le podía hacer sombra. En el terreno de la Óptica, propuso la que velocidad de la luz disminuye en los medios más densos, basándose en un principio de la época griega que proponía que ésta, en su viaje entre dos puntos cualesquiera A y C debía elegir de entre todas las trayectorias posibles, aquella en la se invirtiese el menor tiempo, en nuestro gráfico la ABC.

Comparando el tiempo que invertirían los rayos ABC y AFC en salir del punto A y llegar al F, se reduce a comparar el tiempo invertido en los recorridos HF y BG a todo través del medio aire y agua. Si la velocidad de la luz es más lenta en el agua, es evidente que $t_{BG} < t_{HF}$.

La teoría de Fermat inducía a pensar que la luz era un ente inteligente capaz de decidir antes de llegar a su destino el camino que le llevase menor tiempo, pero la Descartes era aún más inconsistente pues apelaba a su conveniencia a la existencia de corpúsculos cuya velocidad, finita, aumentaba al penetrar en un medio más denso, cosa que no había considerado en otras discusiones previas.

A la hora de elegir entre ambas opiniones, era necesario el arbitraje de la hasta entonces inexistente experiencia que calculase la velocidad de la luz, por lo que la polémica quedó en suspenso. Isaac Newton analizó en más profundidad este comportamiento: para él, defensor de la existencia de átomos de materia y descubridor de las fuerzas gravitatorias, cuando la luz cambia de medio a otro más denso, habría otras fuerzas que los átomos de materia ejercen sobre los corpúsculos de luz, lo que incrementaría su velocidad. (Años después, propone que la existencia de un éter de densidad variable en el exterior e interior del objeto es la que provoca los cambios de trayectoria).

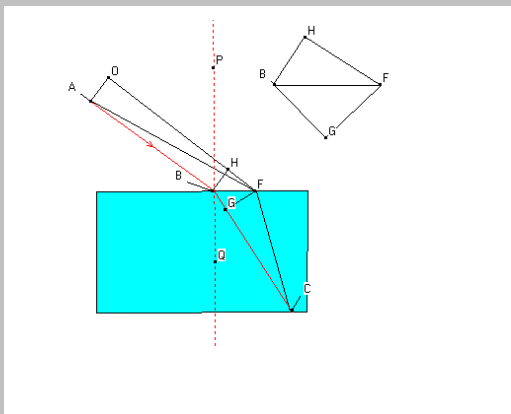


fig 1.77



fig 1.78

El principio del tiempo mínimo ha mostrado una fertilidad poco frecuente a lo largo de la historia de la Física. Hamilton lo aprovecha para su enunciar su *principio de mínima acción*, base de la Mecánica Analítica. El inefable físico norteamericano Richard Feynmann le dedica a este principio un trabajo en el que lo reconcilia con las ideas cuánticas, destacando que aunque es evidente que el rayo no calcula el camino más corto antes de partir, la trayectoria que siguen los fotones tanto en refracción como reflexión, siguen los caminos más *probables*.

A.1 ACTIVIDAD AVANZADA: investigaciones sobre una lupa

Se trata de estimar el tamaño y la distancia aproximada a la que se ve un objeto en el interior de una caja a una distancia desconocida, así como el campo de visión que da la lupa de un punto concreto del objeto.

Hipótesis a demostrar: la imagen se ve más grande y próxima.

Discusión inicial argumentada en el grupo.

Apoyos parciales: ¿qué determina el tamaño aparente de un objeto que se ve a través de una lente?. Si quieres ser riguroso en la respuesta, ¿que tendrías que averiguar en primer lugar?

Diseño de una experiencia (capaz de validar o invalidar la hipótesis): Se hace la observación tapando la caja lateralmente con un vidrio deslustrado que permite la entrada de luz pero impide conocer la posición del objeto

Materiales:

- Caja de madera o cartón
- Papel o vidrio traslúcido
- Pequeños listones
- Pegamento
- Lupa cuentahílos
- Alfileres
- Regla

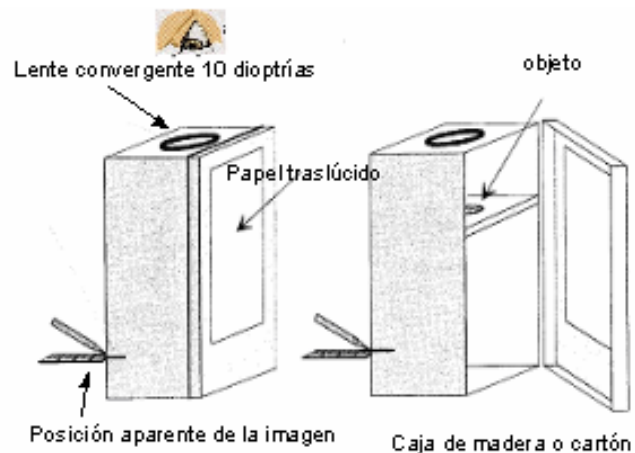


fig 1.79



Hacer medidas y observaciones:

- Observar con un ojo el objeto y con otro una regla situada paralela a la caja, y estima el tamaño de la imagen en centímetros.
- Colocada la lente sobre una superficie de corcho horizontal, observar un lápiz próximo. Determinar el punto imagen de cada extremo por prolongación de los rayos marcadas con alfileres clavados.

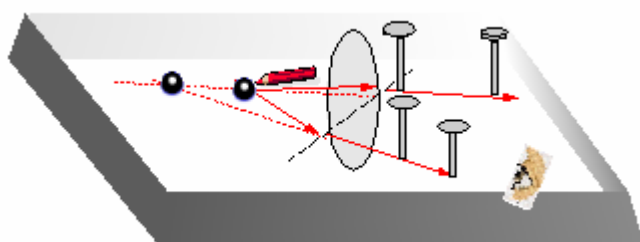


fig 1.80

Procesar la información

Predecir el tamaño y la posición de la imagen a partir de la construcción anterior. Comparar las medidas con los valores obtenidos a partir de la aplicación de la fórmula de las lentes.

A continuación se procede a estimar el campo visual de la lupa. ¿Qué uso se le puede dar a este conocimiento?

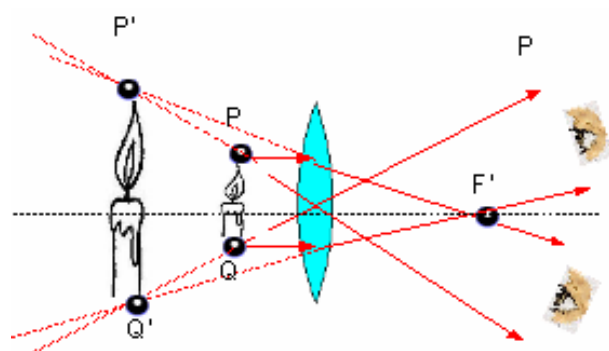


fig 1.81

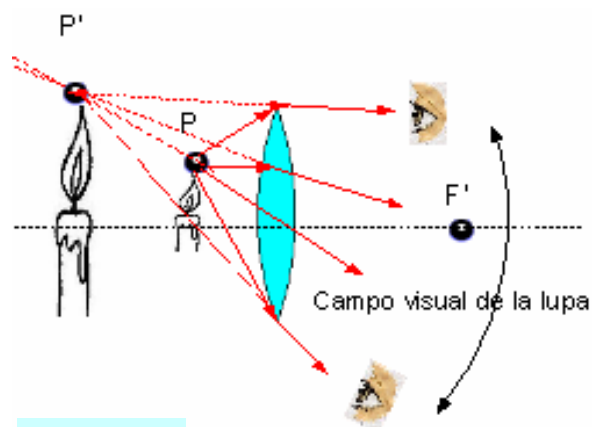


fig 1.82

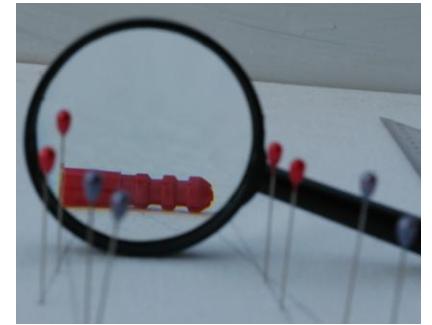
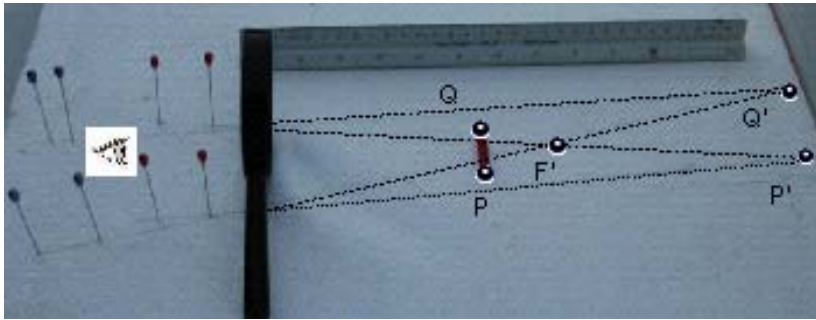
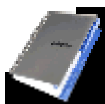


fig. 1.83 Aumento y posición virtual de un objeto, dados por una lente convergente

Elaborar conclusiones

- ¿Cómo actúa la lupa sobre los rayos de luz individuales que la atraviesan?
- ¿Qué consecuencia tiene ello en la visión de las imágenes?
- Un presbita corregido ¿verá las imágenes mayores o menores que el objeto? ¿Más próximas o más lejos?
- Su visión con gafas, ¿será más o menos relajada?
- Relativizar la validez del modelo de rayos.
- Describe algún caso concreto en el que no es válido el modelo de rayos.



Problemas para casa

ESPEJOS

1. Un espejo esférico cóncavo, ha de formar una imagen invertida de un objeto en forma de flecha, sobre una pantalla situada a una distancia de 420 cm delante del espejo. El objeto mide 5 mm y la imagen ha de tener una altura 30 cm. Determinar:

- a) a qué distancia del espejo debe colocarse el objeto
- b) el radio de curvatura del espejo

Efectuar las construcciones geométricas (junio 96)

2. Un objeto luminoso se encuentra delante de un espejo cóncavo. Efectúe la construcción geométrica de la imagen e indique su naturaleza si el objeto está situado a una distancia igual en valor absoluto a:

- a) la mitad de la distancia focal del objeto
- b) el triple de la distancia focal del objeto

3. Calcule a qué distancia debe colocarse un espejo a la izquierda del vértice de un espejo cóncavo cuyo radio de curvatura es 12 cm para que su imagen sea tres veces mayor que el objeto. Interprete los posibles resultados y efectúe las construcciones geométricas correspondientes.

- a) ¿Qué diferencias existen entre una imagen real y una virtual formadas por un sistema óptico centrado?
- b) Realiza un ejemplo de construcción geométrica para cada una de ellas utilizando espejos esféricos. Explica qué tipo de espejo esférico puedes emplear en cada caso.

LENTE

4. Un objeto luminoso de 2 mm de altura está situado a 4 mm de distancia de una pantalla. Entre el objeto y la pantalla se coloca una lente esférica delgada L, de distancia focal desconocida, que produce sobre la pantalla una imagen tres veces mayor que el objeto.

- a) Determine la naturaleza de la lente L así como su posición respecto del objeto y la pantalla.
- b) Calcule la distancia focal, la potencia de la lente L y efectúe la construcción geométrica de la imagen.

5. ¿En qué posición debe colocarse un objeto delante de una lente esférica convergente para producir una imagen virtual? Obtenga gráficamente la imagen

6. Un objeto luminoso está situado a 6 m de una pantalla. Una lente, cuya distancia focal es desconocida, forma sobre la pantalla una imagen real, invertida y cuatro veces mayor que el objeto.

- a) ¿Cuál es la naturaleza y posición de la lente? ¿Cuál es el valor de la distancia focal de la lente?
- b) Se desplaza la lente de manera que se obtenga sobre la misma pantalla una imagen nítida, pero de tamaño diferente al obtenido anteriormente. ¿Cuál es la nueva posición de la lente y el nuevo valor del aumento?

7. Una lente esférica delgada biconvexa cuyas caras tienen radios iguales a 5 cm y el índice de refracción es 1,5, forma de un objeto real una imagen también real reducida a la mitad. Determinar:

- a) la potencia y la distancia focal de la lente
- b) las posiciones del objeto y la lente. Si esta lente se utiliza como lupa, el aumento de la lupa cuando observa un ojo normal sin acomodación.

Efectuar las construcciones geométricas. Datos: distancia mínima de visión neta para un ojo normal: $d = 25$ cm. El medio exterior es el aire

8. Explique mediante construcciones geométricas qué posiciones debe ocupar un objeto, delante de una lente delgada convergente, para obtener:

- a) una imagen real de tamaño menor, igual o mayor que el objeto
- b) una imagen virtual. ¿Cómo está orientada esta imagen y cuál es su tamaño en relación con el objeto?

(Madrid modelo 2001/02)

9. Un sistema óptico centrado está formado por dos lentes delgadas convergentes de igual distancia focal $f = 10$ cm separadas 40 cm. Un objeto de altura 1 cm se coloca delante de la primera lente a una distancia de 15 cm. Determine:

- a) la posición, el tamaño y la naturaleza de la imagen final del sistema, formada por la primera lente.
- b) La posición de la imagen final del sistema, efectuando su construcción geométrica.

10. Una lente convergente de 10 cm de distancia focal se utiliza para formar la imagen de un objeto luminoso lineal colocado perpendicularmente a su eje óptico y de tamaño $y = 1$ cm.

- a) ¿dónde hay que colocar el objeto para que su imagen se forme 14 cm por detrás de la lente? ¿cuál es el tamaño de la imagen?
- b) ¿dónde hay que colocar el objeto para que su imagen se forme 14 cm por detrás de la lente? ¿cuál es la naturaleza y tamaño de esa imagen?

Efectúe la construcción geométrica en ambos casos

11. Defina para una lente delgada los siguientes conceptos: foco objeto, foco imagen, distancia focal objeto y distancia focal imagen.

Dibuje para los casos de lente convergente y divergente la marcha de un rayo que pasa (él o su prolongación) por el foco objeto y por el foco imagen

(Madrid sepbre 2001)

12. Sea un sistema óptico formado por dos lentes delgadas convergentes de la misma distancia focal ($f' = 20$ cm) situadas con el eje óptico común a una distancia entre sí de 80 cm. Un objeto luminoso lineal perpendicular al eje óptico de tamaño $y = 2$ cm está situado a la izquierda de la primera lente y dista de ella 40 cm.

- a) Determine la posición de la imagen final que forma el sistema óptico y efectúe su construcción geométrica.
- b) ¿Cuál es la naturaleza y el tamaño de la imagen?

(Madrid sepbre 2001)

13. Una lente delgada convergente proporciona de un objeto situado delante de ella, una imagen real invertida y de doble tamaño que el objeto. Sabiendo que dicha imagen se forma a 30 cm de la lente, calcule:

- a) la distancia focal de la lente
- b) la posición y naturaleza de la imagen que dicha lente formará de un objeto situado 5 cm delante de ella, efectuando su construcción geométrica.

(Madrid sepbre 2002)

14. ¿En qué posición debe colocarse un objeto delante de una lente esférica convergente para producir una imagen virtual? Obtenga gráficamente la imagen. (Madrid sepbre 1998)
15. Una lente convergente con radios de curvatura de sus caras iguales, y que suponemos delgada, tiene una distancia focal de 50 cm. Proyecta sobre una pantalla la imagen de un objeto de tamaño 5 cm.

- a) calcule la distancia de la pantalla a la lente para que la imagen sea de tamaño 40 cm.
- b) Si el índice de refracción de la lente es igual a 1,5 ¿ qué valor tienen los radios de la lente y cuál es la potencia de la misma?

16. Explique mediante construcciones geométricas qué posiciones debe ocupar un objeto, delante de una lente delgada convergente, para obtener:

- a) una imagen real de tamaño menor , igual o mayor que el objeto.
- b) Una imagen virtual. ¿ cómo está orientada esta imagen y cuál es su tamaño en relación con el objeto?

(Madrid junio 2002)

CUESTIONES

1. Un objeto de 3cm de altura se coloca en el eje óptico de una lente de distancia focal $f' = +50$ mm. Obtener gráficamente en un papel milimetrado la imagen real de dicho objeto en los siguientes casos:

- a. objeto situado en el foco
- b. objeto situado a 40 cm de la lente
- c. objeto situado a 60 cm de la lente

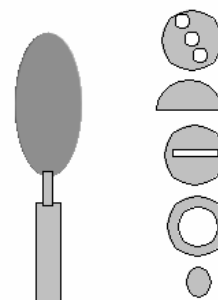
2. Si colocamos un disco de cartón de 3 cm de diámetro a en contacto con una lente de 6cm de diámetro y distancia focal +50 mm, ¿qué diferencias se observan entre la imagen obtenida con el diafragma y sin él?

3. Las lentes divergentes dan imágenes virtuales (no se pueden recoger en una pantalla). ¿Se pueden fotografiar? Razona

4. Si llenas una botella de vidrio transparente con agua y observas a su través, ¿cómo ves la imagen?

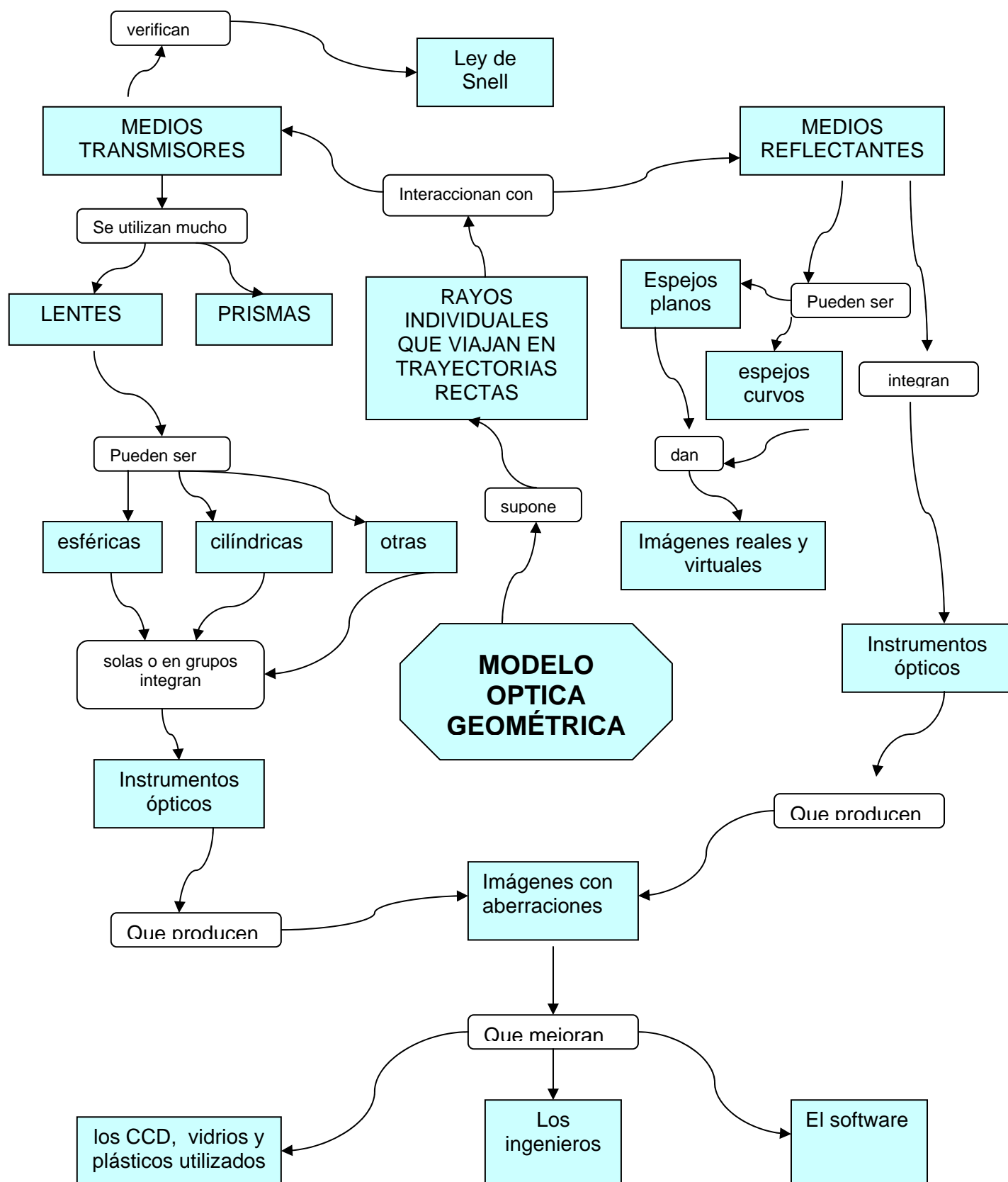
5. ¿Y si el matraz es esférico?

- 6.- Si obtienes con una lupa la imagen real de un foco luminoso con una lupa los diafragmas de cartón indicados, investiga las aberraciones coma, esférica, cromática y distorsión , observando cómo focalizan los rayos individuales en una pantalla



s

MAPA CONCEPTUAL DE OPTICA GEOMÉTRICA



6.2 VIBRACIONES Y ONDAS MECÁNICAS



SUMARIO

- 2.1 Las ondas
- 2.2 Ondas mecánicas
- 2.3 Las ecuaciones del MAS y las ondas.
- 2.4 Interferencia
- 2.5 Ondas mecánicas y sus interferencias
- 2.6 Energía e intensidad de las ondas sonoras
- 2.7 Interferencias y pulsaciones sonoras

LAS ONDAS

Podemos definir una onda como una sucesión periódica de pulsos que transportan energía y cantidad de movimiento a lo largo del espacio. Aparecen tanto en los fenómenos mecánicos como son los terremotos, o el sonido, que necesitan un medio físico para viajar, como en otros de más difícil comprensión como son la naturaleza electromagnética de la luz y las ondas de radio, que pueden viajar en el vacío con su máxima rapidez. Hay incluso ondas de probabilidad asociadas al movimiento de las partículas que se hacen evidentes en el mundo subatómico.

Su estudio tiene la servidumbre de unas matemáticas sencillas imprescindibles para iniciarse en el mundo físico que vamos a tratar:

ONDAS MECÁNICAS

A un muelle largo en tensión del tipo *Slinky* (utilizado en jugueterías) atado por un extremo al pomo de puerta, se le puede imprimir un pulso transversal o longitudinal que veremos viajar hasta el extremo. Si imprimimos una sucesión de pulsos periódicos, obtendremos ondas mecánicas *transversales* y *longitudinales*. En ambos casos, es la tensión del muelle la que procura el movimiento de recuperación.

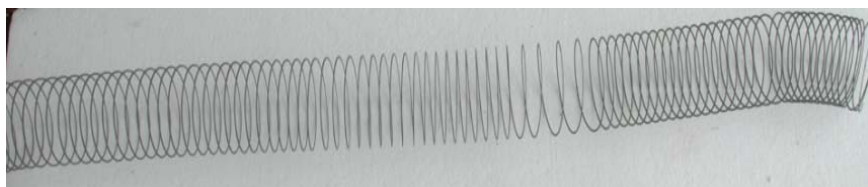


fig 4.1 Pulso longitudinal

Al tirar una piedra a un estanque, se observa una sucesión de pulsos esféricos consecutivos que se desvanecen al cabo de pocos segundos. Asimismo, si colocamos un corcho flotando próximo al foco, un observador percibe que éste sólo experimenta pequeñas oscilaciones verticales al paso de la perturbación (si está muy atento percibirá además, pequeñas oscilaciones horizontales alrededor de una posición central). Mientras que la sucesión de pulsos viaja longitudinalmente, el movimiento de cada gota de agua transcurre (aproximadamente) en una línea perpendicular. Una observación más precisa nos hará percibir que las ondas se van debilitando según se alejan del foco. Las ondas de agua son un ejemplo de *ondas transversales* amortiguadas. Hablando en términos físicos, se dice que se propaga una perturbación portadora de energía y cantidad de movimiento a través de las partículas del medio. Las partículas vecinas de la superficie son las que proporcionan la fuerza recuperadora gracias a la *tensión superficial* del agua que hace las veces de una membrana elástica.

Otras ondas de la naturaleza como el sonido, tienen carácter *longitudinal* porque la dirección en la que se propaga el movimiento coincide con la de movimiento de las partículas. Aquí es la presión de las moléculas circundantes la que procura las fuerzas recuperadoras que vuelven la partícula a su posición tras la perturbación incidente.

LAS ECUACIONES DEL MAS Y LAS ONDAS

El estudio del movimiento de un resorte tiene una gran utilidad, pues es el fundamento de todos los movimientos ondulatorios que se rigen por una variación seno. Es además, un símil muy próximo a los movimientos de los osciladores atómicos.

Ecuaciones del MAS

El ejemplo más sencillo de movimiento ondulatorio es el de una masa sujeta a un resorte, en equilibrio entre su peso y la fuerza recuperadora del muelle, a la que se la separa de la posición del, y se la deja oscilar libremente. Este movimiento se denomina *Movimiento Armónico Simple*.

La posición de la masa respecto del centro en cada instante, se denomina *elongación* y , su máxima elongación, *amplitud*, A , la constante de recuperación del muelle k , el tiempo que transcurre entre dos posiciones idénticas del movimiento, *período*, T . En ausencia de rozamientos, la energía permanece confinada en la región, una conversión continua de energía cinética a potencial y viceversa.



fig 4.2

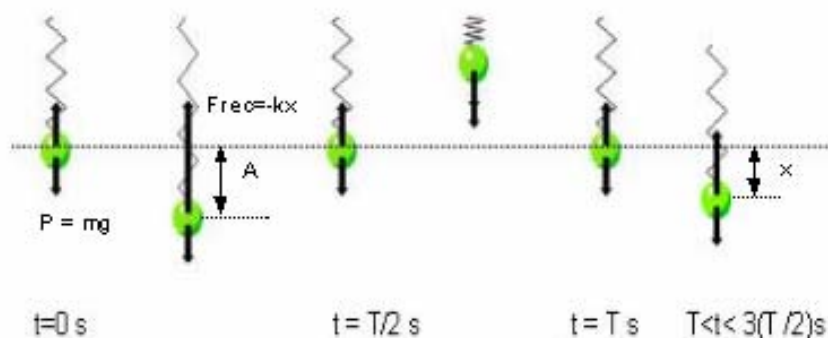


fig 4.3

Aunque la solución correcta deducida de la ecuación diferencial del movimiento

$$F = -kx = m \, d^2x/dt^2$$

escapa a los límites de este curso, es posible aprovechar la coincidencia de que la proyección sobre el eje y de un vector de radio A que gira con velocidad angular ω , coincide con la elongación de la partícula anterior. El significado físico de la constante ω está relacionado con la constante de recuperación del muelle k , y con la masa m que oscila :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

La posición, y , del cuerpo, sigue una relación senoidal, cuya solución , si se inicia el cronometraje cuando el cuerpo pasa por la posición de equilibrio ($x = 0$), es de la forma:

$$y = A \, \text{sen } 2\pi (t/T) = A \, \text{sen } \omega t$$

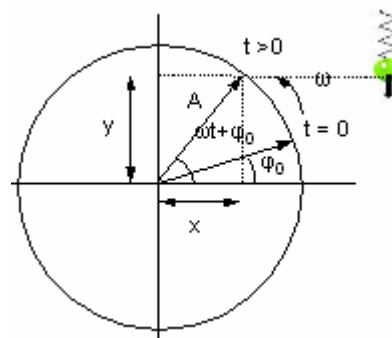


fig 4.4

En el caso de que se inicie el conteo de tiempos cuando el móvil pasa por una posición arbitraria, y_0 , hay que introducir una magnitud angular ϕ_0 llamada *fase inicial* en esta expresión:

$$y = A \, \text{sen } 2\pi (t/T + \phi_0) = A \, \text{sen } (\omega t + \phi_0)$$

si en esta expresión hacemos $t = 0$,

$$y(0) = y_0 = A \, \text{sen } \phi_0, \quad \square \quad \phi_0 = \text{arc sen } x/A$$

Ejemplo 1

Un resorte de constante $k = 2 \, \text{N/m}$ al que se ata una masa $m = 0,5 \, \text{kg}$, oscila horizontalmente sobre una mesa sin rozamientos, describiendo un MAS de amplitud $A = 10 \, \text{cm}$. Si disparamos el cronómetro en el instante en que se encuentra a la derecha del origen, a una distancia y_0 del origen mitad de la amplitud, se pide Ecuación del MAS y su fase inicial

De la ecuación general de un MAS $y = A \, \text{sen } (\omega t + \phi_0)$, se deduce que para $t = 0$ $y_0 = A \, \text{sen } \phi_0$, luego sustituyendo valores,

$$y_0 = 0,10 \, \text{sen } \phi_0 = 0,05 \Rightarrow \phi_0 = \text{arc sen } 0,05/0,01 = \text{arc sen } 0,5 = \pi/6 \quad (\phi_0 \text{ es la fase inicial}).$$

Por otra parte, como $T = 2\pi\sqrt{m/k} = 2\pi\sqrt{0,5/2} = \pi \, \text{s}$, la pulsación ω será $\omega = 2\pi/T = 2\pi/\pi = 2 \, \text{rad/s}$
La ecuación del MAS será por tanto :

$$y = 0,10 \, \text{sen } (2t + \pi/6)$$

Ecuaciones de una onda viajera transversal

Si se efectúan una serie de golpes rítmicos con una punta en una superficie de agua, la sección de la perturbación resultante es similar a la de la gráfica adjunta.

Aquí se observa una doble periodicidad que es conveniente destacar: de un lado, una partícula concreta **B**, mantiene una oscilación vertical armónica descrita por la ecuación

$$y_B = A \sin \omega t$$

pero ahora aparece un hecho nuevo a considerar: si la onda viaja de izquierda a derecha, una partícula genérica **C**, situada a una distancia **x** de la anterior, "tarda" un tiempo τ en percibir la llegada de la perturbación, por lo que cuando inicie su vibración, si el conteo se inició cuando la onda estaba en **B**, a la **C** sólo habrá que computarle un tiempo $(t - x/v)$. En otras palabras, si un cronómetro se dispara para contabilizar el tiempo durante el que vibra el punto B, el tiempo a considerar para el movimiento de C habrá que corregirlo restando $\tau = x/v$ al valor que marque en cualquier instante.

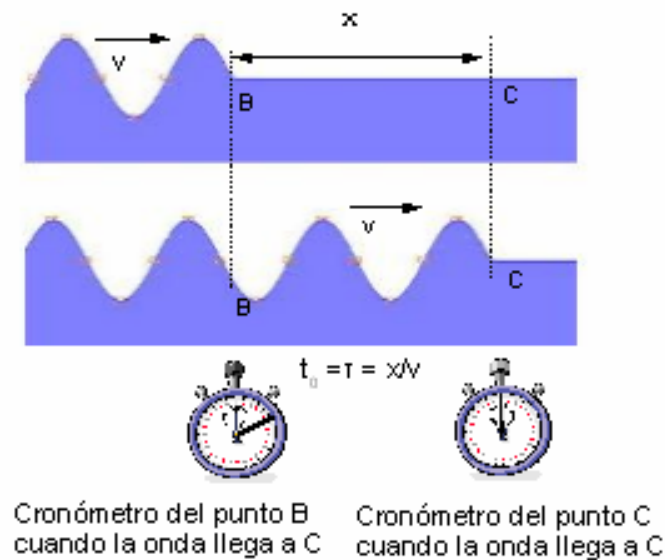


fig 4.5

Si introducimos los parámetros adicionales:

longitud de onda λ como la distancia que recorre la onda en el medio durante el tiempo **T** (*período*), que un punto de la onda invierte en una oscilación completa alrededor de su posición de equilibrio, *número de onda* $k = 2\pi/\lambda$ a una constante proporcional al número de ondas que aparece en la unidad de longitud, podemos generalizar la ecuación de la onda para un punto C genérico:

$$\begin{aligned} y_C = y &= A \sin \omega (t - \tau) = A \sin \omega (t - x/v) = \\ &= A \sin(2\pi t/T - 2\pi x/vT) = A \sin 2\pi (t/T - x/\lambda) = \end{aligned}$$

$$y = A \sin(\omega t - kx)$$

Dependiendo del texto que nos encontremos, esta ecuación toma distintas formas dependiendo del origen de tiempos que considere el autor. Nosotros hemos considerado que el origen de tiempos del cronómetro se elige en el momento que el móvil está en el origen, es decir, *subiendo*.

Si para $t = 0$ el móvil estuviera en la parte más alta, expresaríamos:

$$y = A \sin(\omega t + kx + \pi/2) =$$

$$y = A \cos(\omega t - kx)$$

Si para $t = 0$ estuviera en el origen *bajando*, utilizando la relación

$$\sin(\alpha + \pi) = \sin(-\alpha)$$

la ecuación de la onda quedaría:

$$y = \sin(\omega t - kx + \pi) = \sin(kx - \omega t)$$

$$y = \sin(kx - \omega t)$$

Interesa destacar que esta onda es doblemente periódica:

- En el tiempo, puesto que un punto concreto C, en el que se fija la posición x , vibra con un MAS, cuya gráfica en función del tiempo es una senoide.
- En el espacio, puesto que de hacer una foto de la sección de la onda, observamos puntos distanciados una longitud de onda λ , cuyo estado de vibración es idéntico.

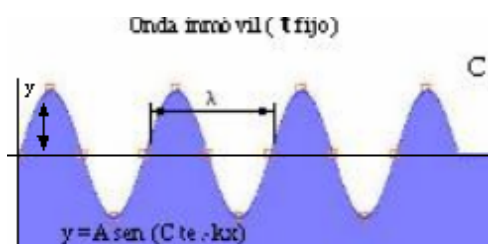


fig 4.6

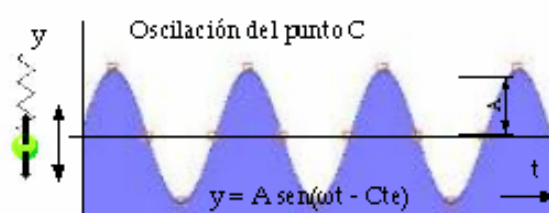


fig 4.7

Es evidente que si la onda viaja en sentido opuesto al indicado, el punto C percibe antes que B la oscilación, el tiempo que señalará el cronómetro referido a nuestro punto C, será ahora $t + \tau$, y repitiendo los pasos anteriores, se llegará a la expresión:

$$y = A \sin(\omega t + kx)$$

Suma de curvas seno y coseno

A los efectos de conocer la perturbación conjunta de varias ondas, es imprescindible recordar las siguientes relaciones:

$$\sin A + \sin B = 2 \sin \frac{1}{2}(A+B) \cos \frac{1}{2}(A-B)$$

$$\cos A + \cos B = 2 \cos \frac{1}{2}(A+B) \cos \frac{1}{2}(A-B)$$

$$\sin A - \sin B = 2 \sin \frac{1}{2}(A-B) \cos \frac{1}{2}(A+B)$$

$$\cos A - \cos B = -2 \sin \frac{1}{2}(A+B) \sin \frac{1}{2}(A-B)$$

Ejemplo 2

Una onda armónica en una cuerda tiene una amplitud de 20 cm , una longitud de onda de 3 m, y una velocidad de 4 m/s

- Calcular el período, frecuencia angular y el número de onda
- Escribe la ecuación de la onda eligiendo el sentido +x como el de propagación de la onda

Solución

- a) Como la velocidad de la onda es $v = \lambda / T \Rightarrow T = \lambda / v = 3 / 4 = 0,75 \text{ s}$
Sabemos que la frecuencia $\nu = 1 / T = 1 / 0,75 = 1,33 \text{ s}^{-1} = 1,33 \text{ Hz}$
La frecuencia angular (o pulsación) $\omega = 2 \pi / T = 2\pi / 0,75 = 8,38 \text{ rad / s}$
El número de onda $k = 2\pi / \lambda = 2 \pi / 3 = 2,09 \text{ rad/ m}$

- b) De la expresión general de una onda que viaja hacia la derecha
 $y = A \text{ sen } (\omega t - kx)$
obtenemos al sustituir valores:

$$y = 0,2 \text{ sen } (8,38 t - 2,09 x)$$

donde y se da en metros

INTERFERENCIAS DE ONDAS MECÁNICAS

Interferencia de ondas transversales

Si se atan dos cuerdas independientes a un anillo que tiene libertad de movimientos según un eje vertical, y se generan vibraciones de igual amplitud y frecuencia , los efectos en éste serán distintos según que la diferencia de fase de las vibraciones sea la misma o no. Así por ejemplo en la primera de las dos figuras, los efectos se refuerzan constantemente, mientras que en la segunda no.

Ambas ondas serán de la forma

$$y = A \text{ sen } (\omega t - kx) = A \text{ sen } 2 \pi (t/T - x/\lambda)$$

al llegar al anillo, si sus caminos respectivos son x_1 y x_2 lo hacen con una diferencia de fase

$\Delta\phi = (2 \pi / \lambda) (x_1 - x_2)$ su composición resultante será:

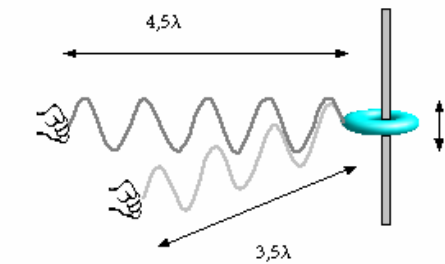
$$y_1 + y_2 = A \text{ sen } \omega t + A \text{ sen } (\omega t + \phi) = A [\text{sen } \omega t + \text{sen } (\omega t + \phi)] =$$

$$2A \cos \phi/2 \text{ sen } (\omega t + \phi/2) \pi$$

Hay casos particulares especialmente interesantes:

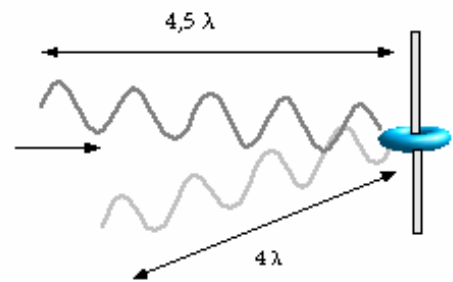
Interferencias constructivas:

Es evidente que cuando ϕ toma los valores $n \pi$, donde n es un número entero, se verifica que $\cos \phi/2 = \pm 1$ la amplitud del movimiento, $2A \cos \phi/2$, hace máxima y ambas oscilaciones interfieren favorablemente



Interferencia constructiva $\Delta x = 4,5\lambda - 3,5\lambda = \lambda$

fig 4.8



Interferencia destructiva $\Delta x = \lambda/2$ $\Delta\phi = \pi$

fig 4.9

Interferencias destructivas

Cuando

$$\Delta\phi = (2n+1)\pi, \cos\phi/2 = 0, \text{ lo que ocurre para } \Delta\phi/2 = \pi/2, 3\pi/2, 5\pi/2,$$

y la amplitud resultante se hace nula en todo momento.

Algoritmo del vector giratorio de Fresnel

La composición de dos ondas de igual amplitud y distinta fase inicial se puede construir también con un algoritmo ideado por Fresnel inicialmente para MAS. El fundamento está en hacer corresponder las proyecciones verticales de dos vectores giratorios de amplitudes A_1 y A_2 con MAS de diferencia de fase constante y componer la vibración resultante sumando estas proyecciones. Veamos

Dados dos MAS de igual frecuencia y fases iniciales distintas,

$$x_1 = A \cos(\omega t + \phi_1)$$

$$x_2 = A \cos(\omega t + \phi_2)$$

su composición es otro MAS de igual frecuencia ω , de una amplitud suma vectorial de las amplitudes iniciales y una nueva fase inicial Ψ

$$x_R = A_R \cos(\omega t + \Psi)$$

El algoritmo representa vectores giratorios en sentido antihorario, situados en el instante inicial en las posiciones angulares marcadas por sus respectivos desfases que describen círculos de radio A_1 y A_2 con velocidad angular ω . El primer gráfico representa el instante cero y el otro, un tiempo t arbitrario en que los vectores habrán girado un ángulo ωt .

Sus proyecciones instantáneas sobre el eje x darán la elongación respecto de sus orígenes, y la suma de ambas $x_1 + x_2$ dará la elongación x_R resultante de la interferencia de ambas.

Unas sencillas proyecciones, aplicando Pitágoras dan el conocido resultado

$$A_R^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2 A_1 A_2 \cos(\phi_2 - \phi_1)$$

$$\Psi = \arctg\left(\frac{y_{10} + y_{20}}{x_{10} + x_{20}}\right) =$$

$$\Psi = \arct\left[\frac{A_1 \sin \omega t + A_2 \sin \omega t}{A_1 \cos \omega t + A_2 \cos \omega t}\right]$$

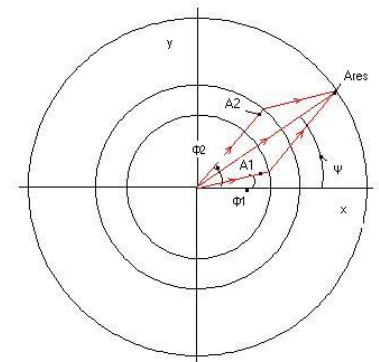


fig 4.10

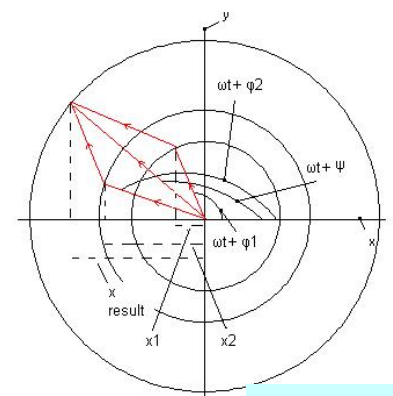


fig 4.11

Ejemplo 3

Dos cuerdas situadas en los focos F_1 y F_2 , distanciados 10 cm a las que se sujeta un anillo situado en una eje paralelo a la línea que une dichos focos, alejado 50 cm de éste, transportan sendas ondas casi paralelas de ecuaciones $y_1 = 0,02 \sin(30t - 5x)$ y $y_2 = 0,02 \sin(30x - 5x)$, cuyos efectos se superponen en el citado anillo. El anillo, inicialmente en equilibrio, está situado a 20 cm del punto medio del eje, puede desplazarse verticalmente a lo largo de él. Se pide:

- Diferencia de fase entre las dos señales.
- Separación del anillo de la posición de equilibrio (amplitud de la onda resultante), en el instante $t = 10$ s

Solución

Identificamos las magnitudes de la onda $\omega = 30 \text{ rad/s}$ $k = 5 \text{ rad/m}$ $A = 0,02 \text{ m}$

- Puesto que las dos señales salen a la vez, la única diferencia de fase será debida a la diferencia del Δ camino que recorren $\Delta x = 0,1 \text{ sen } \varphi$, pero de otra parte $\text{sen } \varphi = 0,20 / 2 = 0,1 \text{ rad} \Rightarrow \Delta x = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01 \text{ m} \Rightarrow \Delta \varphi = \Delta x (2 \pi / \lambda) = 0,01 \cdot 2 \pi / \lambda$.

La longitud de onda la obtenemos de la ecuación de la onda a través de cálculos sencillos

$$\text{pero } T = 2 \pi / \omega = 2 \pi / 30 \text{ s} \quad \lambda = 2 \pi / k = 2 \pi / 5 \text{ (rad/m)} \quad \text{y como } \lambda = v T$$

$$v = \lambda / T = (2 \pi / 5) / (2 \pi / 30) = 30/5 = 6 \text{ m/s y, finalmente :}$$

$$\Delta \varphi = \Delta x (2 \pi / \lambda) = 0,01 \cdot 2 \pi / \lambda = 0,01 \cdot 2 \pi / (2 \pi / 5) = 0,01 / 5 = 0,004 \text{ rad}$$

- De la expresión $y_1 + y_2 = A \text{ sen } \omega t + A \text{ sen } (\omega t + \varphi) = A [\text{sen } \omega t + \text{sen } (\omega t + \varphi)] = 2A \cos \Delta \varphi / 2 [\text{sen } (\omega t + \Delta \varphi / 2)]$, obtenemos:

$$y_1 + y_2 = 0,02 \cdot 2 \cos 0,004/2 [\text{sen } (30t + 0,004/2)] = 4.1 \text{ sen } (30t + 0,002) \text{ que para } t = 10 \text{ s da:}$$

$$y_1 + y_2 = 4.1 \text{ sen } (30 \cdot 10 + 0,002) \approx -0,04 \text{ m}$$

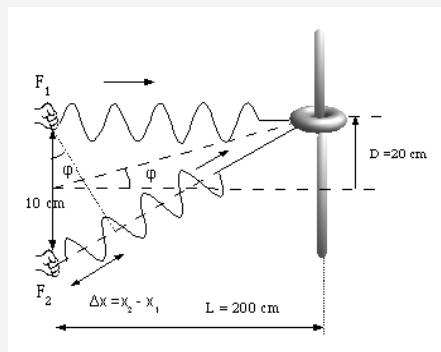


fig 4.1.2

Hipérbolas en el agua

Dos piedras, al caer simultáneamente en el agua, producen dos focos de ondas circulares de igual frecuencia que interfieren en los puntos que tienen una perturbación simultánea. Estos puntos forman lugares geométricos en forma de hipérbola, en los que la interferencia es máxima y otros en los que es mínima. Si consideramos las secciones F_1P y F_2P se obtienen curvas idénticas a las anteriores de las cuerdas. Como vimos antes, dependiendo de la diferencia de camino entre ambos rayos, su composición dará máximos o mínimos según que sea múltiplo entero de longitudes de onda o múltiplo impar de semilongitudes de onda.

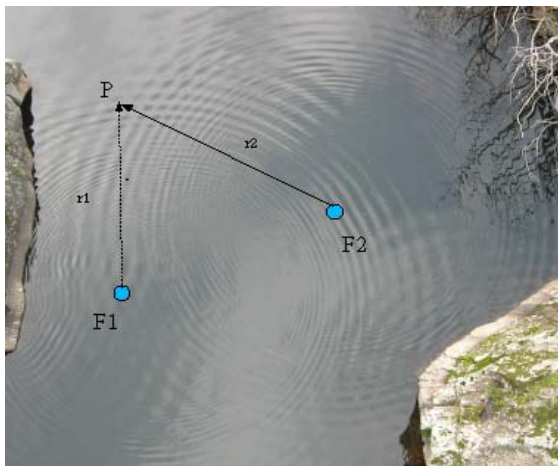


fig 4.13

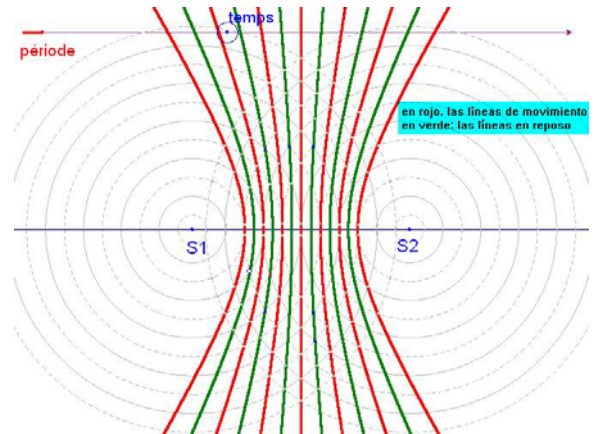


fig 4.14

Gracias a la informática, los programas de simulación van teniendo un protagonismo creciente (aunque si no se dosifican convenientemente pueden falsear la realidad). La figura de la derecha pertenece a un software interactivo¹ que permite variar a voluntad el período de dos ondas sincronicas. En él se observan las hipérbolas de máximos y mínimos conforme cambia el período de las oscilaciones..

Ondas estacionarias

Cuando en una cubeta larga con agua, se provoca una ondulación transversal en un extremo, ésta viaja en la dirección de la pared del otro. El resultado es la aparición de interferencias como la de la figura. Parece como si en la pared naciera un nuevo foco de ondas de frecuencia idéntica al incidente pero con la fase opuesta, de modo que la amplitud resultante en cada punto es la suma algebraica de ambas. (Esta es la causa de las incómodas gotas que nos salpican cuando estamos en la orilla de un muelle o cuando transportamos un plato de sopa bastante lleno).

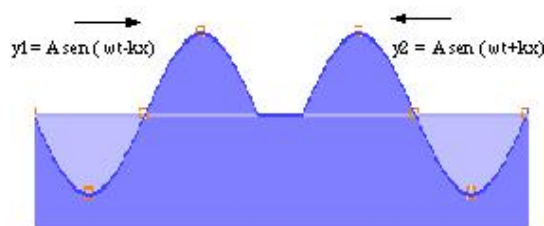


fig 4.15

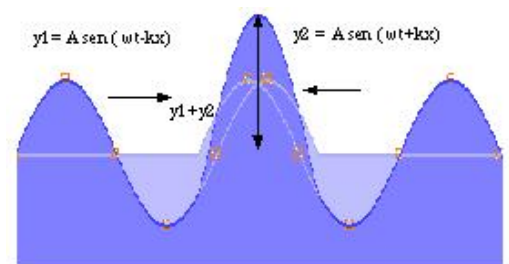


fig 4.16

La composición resultante de ambas ondas en un punto cualquiera, se obtendrá mediante una sencilla suma algebraica de las amplitudes:

$$Y = A \sin(\omega t - kx) - A \sin(\omega t + kx) = A [\sin(\omega t - kx) - \sin(\omega t + kx)] = A [2 \cos \omega t \sin kx] = 2A \sin kx \cos \omega t$$

La resultante es una onda senoidal función del tiempo, modulada por otra que depende del espacio. Puesto que esta última se hace cero para los valores de x tales que:

¹ Cabri II Plus.

$$\text{sen } kx = 0 \Rightarrow kx = 0, \pi, 2\pi, \dots \Rightarrow (2\pi/\lambda)x = 0, \pi, 2\pi, \dots$$

$$\Rightarrow x = 0, \lambda/2, \lambda, 3\lambda/2, \dots$$

O sea, existen puntos en el medio a las distancias indicadas del origen, que tras la estabilización de ambas perturbaciones, se encuentran permanente en reposo. La energía se encuentra confinada en regiones limitadas por las coordenadas indicadas²

ONDAS DE SONIDO

Una onda sonora se origina cuando una lámina flexible oscila de modo periódico con una frecuencia suficientemente alta. Aparece entonces una sucesión de pulsos longitudinales que golpean a las moléculas de aire del medio de modo que se propagan trenes sucesivos de condensaciones y rarefacciones de aire de modo parecido al de las esferas de un conocido juguete científico. El movimiento oscilatorio de la lámina respecto a su posición de equilibrio, provoca condensaciones del medio a la ida y rarefacciones a la vuelta que se propagan a una velocidad aproximada de 330 m/s, que al llegar a la membrana elástica del tímpano producen la sensación de sonido. Ya Newton las interpretaba de modo correcto aunque no explicó las interferencias sonoras que se producían cuando diapasones de casi igual frecuencia producían un tercer sonido.

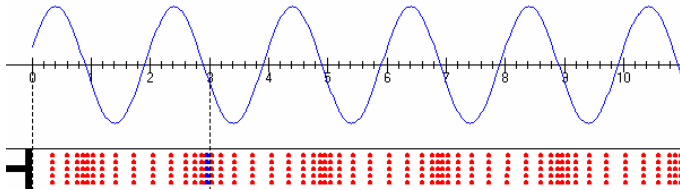


fig 4.17 Onda de sonido



fig 4.18

El sonido necesita del aire para transportar *energía y cantidad de movimiento*, como demuestra el hecho de que al introducir un despertador dentro una campana en la que se ha hecho el vacío, éste deja de oírse.

A efectos de conseguir una representación matemática del fenómeno, podemos representarlo de dos formas:

La primera representa en la línea de ordenadas, la separación de cada partícula respecto a la posición de equilibrio. Como verás, es una curva del tipo *seno*. Una representación matemática en la que, fijado un instante concreto, se llevan a las ordenadas verticales las elongaciones (desplazamientos de las partículas de la posición de equilibrio) y a las horizontales la línea por la que viaja la perturbación. En las zonas de máximo las amplitudes son grandes y viceversa.

La segunda simula una fotografía de las moléculas de aire. En unas zonas hay capas sucesivas de aire más próximas entre sí en unas zonas (máximos) y más separadas en otras (mínimos).

² www.rincónodelvago.com

La energía transportada en un sonido

Una lámina elástica de un diapasón, puede hacerse oscilar separándola de su posición de equilibrio y soltándola a continuación. La energía potencial elástica almacenada en la deformación, se comunica longitudinalmente a las moléculas de aire del medio a través de golpes sucesivos entre ellas haciéndolas describir un movimiento armónico alrededor de su posición de equilibrio. Si la oscilación se mantiene de modo indefinido, el pulso inicial se mantiene breves instantes hasta su extinción.

El oído humano³ los podemos asociar a un instrumento que recoge variaciones de presión, las transmite a una membrana elástica que se deforma alternativamente, viajan a través de la *cadena de huesecillos* hasta el nervio auditivo que hace de *transductor* y finalmente hasta el cerebro.

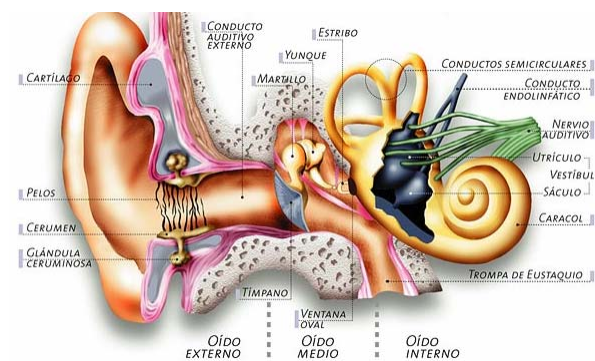


fig 4.19

El sonido de cada lámina se propaga en frentes de onda esféricos de radio creciente de modo que aunque la amplitud decaiga, la energía por unidad de tiempo de todos ellos es la misma (si no, habría pozos o sumideros de energía) . A este cociente se le llama como sabemos, **potencia** .

$$P = W/t \quad \text{y las unidades} \quad [P] = \text{julios} / \text{segundo} = \text{Watios}$$

La energía por unidad de tiempo que atraviesa la unidad de superficie de cada frente, se llama **intensidad** . Se define como

$$I = P/t = (W/t) / S \quad \text{y las unidades serán} \quad [I] = \text{Watios} / \text{m}^2$$

Así como el sentido de la visión, el oído es un instrumento sumamente sensible, pues puede percibir sonidos en una gama de frecuencias e intensidades muy amplia. Se ha medido la mínima intensidad que un individuo medio percibe, la llamada *intensidad umbral*, que es del orden de 10^{-12} W/m^2 . Sin embargo, para dar respuesta a una escala tan amplia, nuestra percepción es aproximadamente *logarítmica*, es decir, que si la intensidad inicial de un sonido I_0 , crece en un factor mil ($10^3 I_0$) sólo lo percibimos como si lo hubiera hecho tres veces, como $3 I_0$.

Por esta razón es más ilustrativo para nuestra percepción del fenómeno, elegir otra escala más acorde, que llamaremos *decibélica* . El *decibelio* es una unidad submúltiplo del *belio* cuyo nombre deriva del científico *Bell* y para medirlo se hace en relación a la intensidad umbral. Es decir:

$$I \text{ (dB)} = 10 \log (I / I_0)$$

³ http://usuarios.discapnet.es/ojo_oido/index.htm

Ejercicio

Una fuente sonora puntual emite con una potencia de 10^{-6} W

a) determine el nivel de intensidad expresado en decibelios a 1 m de la fuente sonora.

b) ¿a qué distancia de la fuente el nivel se ha reducido a la mitad del valor anterior?

Dato: el umbral de audición es de $I_0 = 10^{-12}$ W/m²

Solución :

a) De la definición de intensidad:

$$I = P/S = P / 4\pi R^2 = 7,96 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

El nivel de intensidad sonora :

$$\beta = 10 \log (I/I_0) = 49 \text{ dB}$$

c) el nuevo nivel:

$$\beta' = 29,5 = 10 \log (I'/I_0) \Rightarrow I' = 7,08 \cdot 10^{-9} \text{ W/m}^2$$

Ejercicio

Dos sonidos tienen una intensidad sonora de 50 dB y 70 dB respectivamente. Calcula la relación entre sus intensidades.

Solución:

$$\beta = 10 \log (I/I_0) = 50 ; \quad \beta' = 10 \log (I'/I_0) = 70; \Rightarrow \\ I/I_0 = 10^5 \text{ y } I'/I_0 = 10^7$$

El cociente de las igualdades da:

$$10^7/10^5 = I'/I = 10^2$$

Interferencias sonoras

El sonido es una onda *longitudinal* que viaja en el aire con una velocidad de unos 330 km/s dependiendo de la temperatura. Las partículas de aire que lo propagan vibran en su misma dirección en un MAS con dirección horizontal. Cuando dos ondas sonoras interfieren en un punto del medio, aunque su visualización sea más difícil, interfieren lo mismo que las transversales. Al principio de sus investigaciones ópticas, Young pensaba que, como el sonido, la luz era una onda longitudinal porque su transmisión mediante impactos en el hipotético éter hacía imposible fuerzas elásticas entre éstas que hicieran posible una oscilación vertical. Su base experimental para esta suposición, estaba en el fenómeno de las *pulsaciones*, que se produce cuando se hacen vibrar dos diapasones con frecuencias muy próximas y aparece un tercer sonido de frecuencia muchísimo menor.



Las ondas mecánicas producen interferencias cuando dos o más se encuentran en un punto del medio. Sus efectos se deducen de aplicar las leyes de Newton a los choques entre partículas del medio que las soporta. Una vez que interfieren de modo instantáneo, cada una recobra su forma inicial y viaja independientemente.

Sólo en el caso de que estén encerradas en un medio limitado, las interferencias se pueden mantener indefinidamente y se llaman *estacionarias*.



PULSACIONES SONORAS ("BEATS")

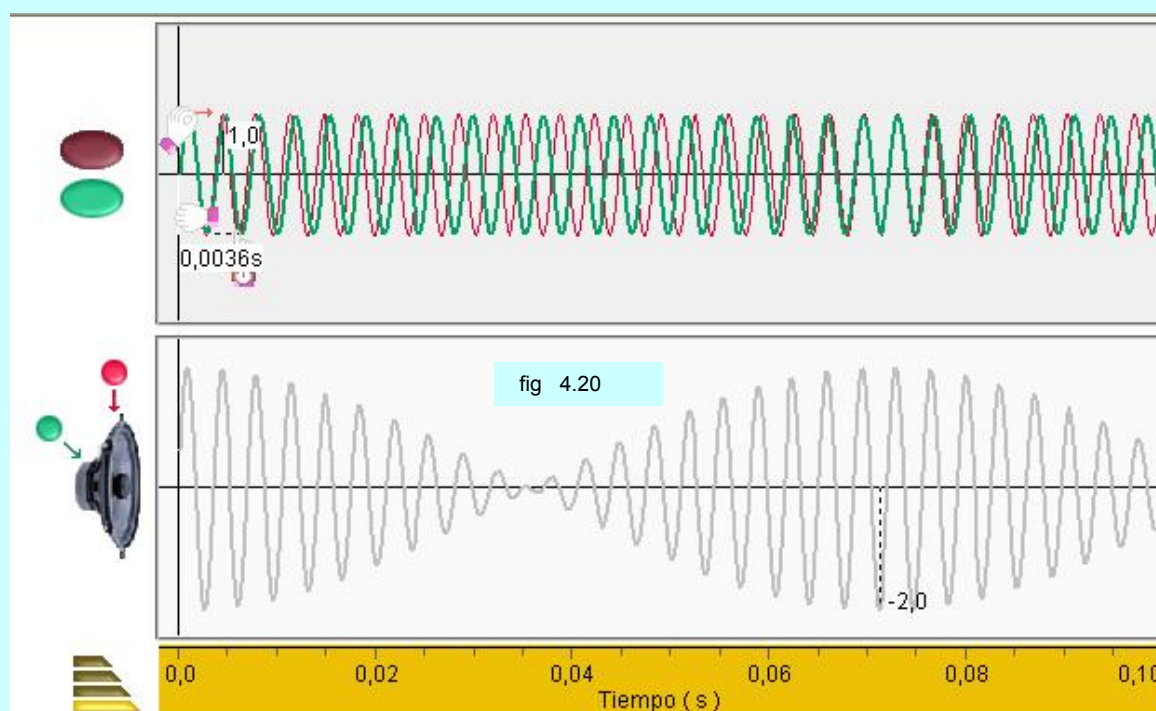
OBJETIVO: Obtener pulsaciones sonoras de frecuencia , amplitud y fase inicial variables.

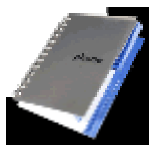
FUNDAMENTOS: El hecho de que dos diapasones de frecuencias ligeramente distintas diera lugar a un sonido añadido de una frecuencia mitad de la diferencia entre ambas, fue uno de los motivos, junto con la observación de ondas en el agua, que indujo a Young a proponer la naturaleza ondulatoria de la luz. Hoy día es fácil conseguirlos con programas de " software " científico" como el que utilizamos en versión de prueba que tienen la ventaja de que las frecuencias se pueden cambiar hasta un margen mucho más amplio.

- Cambia a voluntad la frecuencia , amplitud y fase inicial de las dos ondas. Clasifica los sonidos que produce en grave y agudos.
- Añade un segundo sonido a uno concreto y comprueba la aparición de las llamadas pulsaciones
-

CUESTIONES

- En una fotocopia de la gráfica adjunta, suma gráficamente dos trozos estrechos de las ondas de casi igual frecuencia.
- Identifica en el gráfico la frecuencia y amplitud de la onda roja.





Problemas para casa

MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE

1. En un MAS se duplica la frecuencia, discutir qué ocurre con su período, velocidad máxima, aceleración máxima, energía total.
2. Un MAS vibra con 2 s de período y 0,2 m de amplitud. Suponiendo la fase inicial nula
 - a) calcula la velocidad y aceleración cuando el cuerpo se encuentra a un sexto de período de la posición de equilibrio.
 - b) Calcula la velocidad y aceleración máxima
3. Un cuerpo colgado de un muelle helicoidal realiza un MAS, barriendo un espacio de 0,50 m. En una oscilación completa invierte 3,0 s.
 - a) Calcular: la velocidad máxima, un segundo después de pasar por el punto más bajo de la trayectoria
 - b) La aceleración máxima
4. A un resorte cuya longitud natural es 40 cm. Se le pone una masa de 50 g unida a su extremo libre. Cuando esta masa está en su posición de equilibrio, B, la longitud del resorte es de 45 cm. La masa se impulsa 6 cm hacia abajo y se suelta (posición C).
 - a) ¿cuál será la constante del resorte?
 - b) ¿Cuánto vale su aceleración cuando el resorte está separado 6 cm de su posición de equilibrio?
 - c) ¿Cuánto vale su aceleración cuando ha alcanzado una posición de 2 cm por encima del equilibrio?
 - d) ¿Cuál será la fuerza del resorte en el caso anterior?
 - e) Dibuja un esquema con las diferentes posiciones descritas (U. Salamanca)
5. Una masa puntual de 10 g está sujeta a un muelle que vibra a 3 Hz. En el instante inicial pasa por el centro de la vibración con una velocidad de 5 cm/s en el sentido negativo. Determina:
 - a) Tiempo hasta que su velocidad se anule.
 - b) La ecuación del movimiento
 - c) La expresión de la E. Cinética en función del tiempo.
 - d) La aceleración cuando la velocidad se hace nula.
6. Una partícula se mueve con un MAS de período 4 s y fase inicial 0,8 rad. Se sabe que en el instante $t = 2$ s, la velocidad es de 3 m/s. Determina:
 - a) la ecuación del movimiento.
 - b) Elongación, velocidad y aceleración a los 1,82 s de iniciarse el movimiento.
 - c) La velocidad máxima y el instante en que la adquiere por primera vez.
7. Un oscilador armónico constituido por un muelle de masa despreciable, y una masa en el extremo de valor 40 g, tiene un período de oscilación de 2 s.
 - a) ¿Cuál debe ser la masa de un segundo oscilador, construido con un muelle idéntico al primero, para que la frecuencia de oscilación se duplique?
 - b) Si la amplitud de las oscilaciones en ambos osciladores es 10 cm, ¿cuánto vale, en cada caso, la máxima energía potencial del oscilador y la máxima velocidad alcanzada por su masa?
8. Una masa de 3g oscila con un MAS de ecuación $x = 0,5 \cos(0,4t + 0,1)$. Determine:
 - a) amplitud, frecuencia, fase inicial y posición en $t = 20$ s
 - b) energías cinética máxima y mínima de la partícula, indicando en qué posiciones se alcanzan.
9. Un oscilador armónico constituido por un muelle de masa despreciable, y una masa en el extremo de valor 40 g, tiene un período de oscilación de 2 s
 - a) ¿Cuál debe ser la masa de un segundo oscilador, construido con un muelle idéntico al primero, para que la frecuencia de oscilación se duplique?
 - b) Si la amplitud de las oscilaciones en ambos osciladores es 10 cm, ¿cuánto vale, en cada caso, la máxima energía potencial del oscilador y la máxima velocidad alcanzada por su masa?
10. Si en un MAS se duplica la frecuencia, discutir qué ocurre con:
 - a) su período
 - b) su velocidad máxima
 - c) su aceleración máxima
 - d) su energía total.
11. En un MAS, decir cómo varían las siguientes magnitudes al aumentar su frecuencia: amplitud, velocidad, longitud de onda, período.

ONDAS MECÁNICAS

12. Una partícula de masa $m = 0,5$ Kg, está unida a un muelle ideal de constante recuperadora $k = 200$ N/m, situado sobre una mesa horizontal. La partícula se encuentra inicialmente en reposo sobre dicha mesa. Se le da a la partícula una velocidad inicial de 1,5 m/s, que comprime el muelle, para que empiece a oscilar. ¿Cuánto vale la amplitud, A, y la fase inicial ϕ ? (Madrid, sepbre, 93) Solución:
13. Una perturbación, que consiste en un MAS que separa las moléculas de un medio de sus posiciones de equilibrio una distancia máxima $1,34 \cdot 10^{-9}$ m y de una frecuencia 1,5 kHz, se propaga como una onda plana en línea recta, dando lugar a un movto. ondulatorio de 1 m de longitud de onda. Tomando como dirección de propagación el eje OX, determinar el período y la velocidad de propagación. Escribir además la función de ondas en los dos casos siguientes: a) en el instante inicial, la molécula que se encuentra en el origen de coordenadas está en su posición de equilibrio. b) en el instante inicial, la molécula que se encuentra en el origen de coordenadas, está separada de su posición de equilibrio la máxima elongación. Solución:
14. La ecuación de propagación de una onda que se genera en una cuerda, se puede expresar de la forma: $y(x,t) = 0,3 \cos(\dots)$

$300\pi t - 10x + \pi/2$ donde x se expresa en metros y t en segundos. Calcular:

- la frecuencia y la longitud de onda.
- la velocidad de propagación de la onda. (Madrid, junio, 1995)

15. Un movimiento ondulatorio está representado por la ecuación:

$$y = 0,05 \sin(1992t - 6x)$$

donde las distancias x están expresadas en metros, tiempo, en segundos

- Calcular amplitud, frecuencia y long. de onda de las vibraciones.
- Calcular la dist. recorrida por la onda en $t = 3$ s. escribir la ecuación de una onda, idéntica a la anterior, que se propaga en sentido contrario.
- indicar el significado de x , t , y .

16. Una onda armónica transversal que se propaga a lo largo de la dirección positiva del eje X , tiene las siguientes características: $\lambda = 5$ cm, long. de onda $= 8\pi$ cm. velocidad de propagación $v = 40$ cm/s. Sabiendo que la elongación de la partícula en $x = 0$ m, $t = 0$ s es de 5 cm, determinar:

- número de onda y frecuencia angular de la cuerda.
- la ec. que representa el MAS de la partícula de ascisa $x = 0$.
- la ec. que representa la onda armónica transversal indicada. (junio, 96)

17. Un tren de ondas armónicas se propaga en un medio unidimensional de forma que las partículas del mismo están animadas de un m. a.s. representado por $y = A \sin(\pi/3 + \phi)$ Determine:

- La velocidad de propagación de las ondas sabiendo que su longitud de onda es de 210 cm.
- La diferencia de fase en un instante correspondiente a dos partículas del medio separadas una distancia de 210 cm.

18. Una onda transversal que se propaga en una cuerda coincidente con el eje X , tiene por expresión matemática $y(x,t) = 2 \sin(7t - 4x)$, en unidades del S.I. Determine:

- la velocidad de propagación de la onda y la velocidad máxima de vibración de cualquier punto de la cuerda.
- El tiempo que tarda la onda en recorrer un punto igual a la longitud de onda. (junio 2000)

19. Uno de los extremos de una cuerda tensa, de 6 m de longitud, oscila transversalmente con un movimiento armónico simple de frecuencia 60 Hz. Las ondas generadas alcanzan el otro extremo de la cuerda en 0,5 s. Determine:

- La longitud de onda y el número de onda de las ondas de la cuerda.
- La diferencia de fase de oscilación existente entre dos puntos de la cuerda separados 10 cm.

20. Una onda armónica transversal de frecuencia 80 Hz y amplitud 25 cm se propaga a lo largo de una cuerda tensa de gran longitud, orientada según el eje X , con una velocidad de 12 m/s en sentido positivo. Sabiendo que en el instante $t = 0$ el punto de ola cuerda de ascisa $x = 0$ tiene una elongación $y = 0$ y su velocidad de oscilación es positiva, determine:

- la expresión matemática de la onda
- la expresión matemática que representa la velocidad de oscilación en función del tiempo en un punto de la cuerda de ascisa $x = 75$ cm
- los valores máximos de velocidad y aceleración de los puntos de la cuerda.

- La diferencia de fase de oscilación en un mismo instante entre dos puntos de la cuerda separados 37,5 cm.

CUESTIONES

21. Se recortan dos tiras de cartón estrechas sobre las que se dibujan una serie de líneas espaciadas 1 cm simulando los máximos de una perturbación ondulatoria, y se fijan sobre dos puntos separados 1 cm en una línea que simulan ser los focos F_1 y F_2 .

22. Dibuja el lugar geométrico de los puntos del espacio P en los que la diferencia de caminos sea de dos longitudes de onda. Lo mismo para 1,5 longitudes de onda

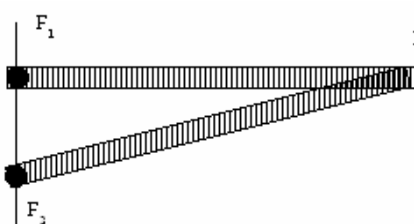


fig 4.21

23. En la figura adjunta F_1 F_2 simulan ser los focos emisores en un medio acuoso de dos ondas sincronas de igual longitud de onda. Los círculos representan los valles de la perturbación de cada onda. Se pide responder en qué punto de los A, B, C se produce una doble cresta, un doble valle o un punto nodal

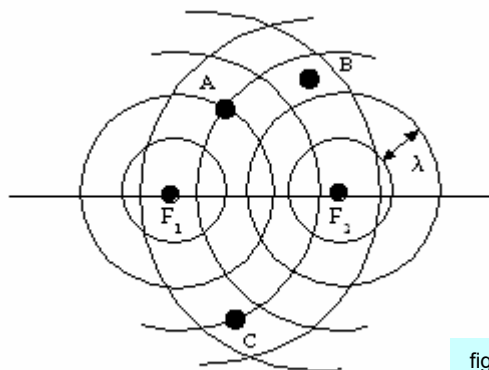


fig 4.22

24. Dos focos están separados 6 cm y emitiendo en igual fase producen ondas superficiales en el agua con una longitud de onda de 2 cm. Dibujar las líneas nodales lejos de los focos. Determina la posición de cada línea por medio de arcos de circunferencia trazados desde los focos. Medir el ángulo que forma la segunda línea nodal con la línea central del diagrama. Comparar el seno de este ángulo con el que resulta de aplicar la ecuación

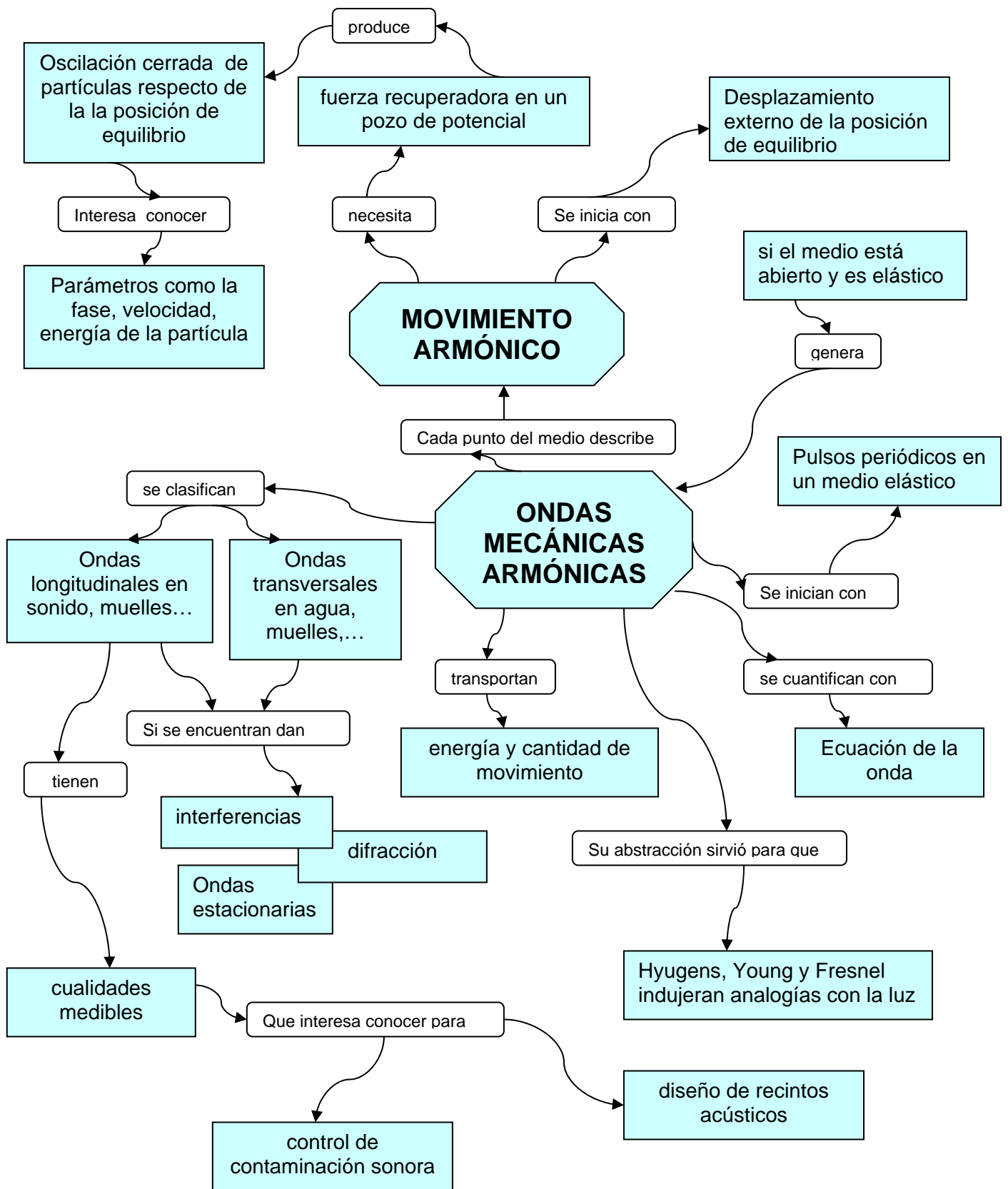
$$\sin \phi = (2n + 1) \lambda / d$$

25. Una onda armónica que se propaga por un medio unidimensional tiene una frecuencia de 500 Hz y una velocidad de propagación de 350 m/s.
- ¿qué distancia mínima hay entre dos puntos del medio que oscilan con una diferencia de fase de 60° ?
 - ¿cuál es la diferencia de fase de oscilación en un cierto

punto para un intervalo de tiempo de 0,1 s? (Junio 2000)

26. Si alguien se propusiera agitar periódicamente el extremo de una cuerda tensa tres veces por segundo, ¿cuál sería el período de las ondas armónicas transversales generadas en la cuerda? Razonar. (Madrid, junio, 1994)
27. Sea una onda armónica de la forma $Y(x,t) = 0,5 \sin(0,1x - 0,4t)$, donde todas las magnitudes vienen en el SI. Determinar la longitud de la onda y la velocidad de propagación. (Madrid, junio, 1997)
28. ¿Con qué velocidad se propaga una onda armónica, cuya longitud de onda es de 0,5 cm y su frecuencia $6 \cdot 10^{10}$ Hz ?
29. Escriba la expresión de una onda armónica unidimensional como una función de x y t que contenga las magnitudes indicadas en cada uno de los siguientes apartados:
a) frecuencia angular ω y velocidad de la propagación
b) período T y número de onda k .
c) Explique por qué es una función doblemente periódica (junio 2002)
30. Una onda armónica, que viaja a 15 m/s en la dirección positiva del eje X con una amplitud de 0,5 m y una longitud de onda de 0,3 m. Escriba la ecuación de la onda como una función del tiempo para un punto al que le llega la perturbación y está situado en $x = 0,4$ m.
31. La expresión matemática de una onda que se propaga por una cuerda tensa según el eje X es: $x = 0,5 \sin(6\pi t - 2\pi x)$. Determine:
a) valores de longitud de onda y velocidad de propagación de la onda.
b) Las expresiones que representan la elongación y la velocidad de vibración en función del tiempo, para un punto de la cuerda situado a una distancia $x = 1,5$ m del origen.
c) Los valores máximos de la velocidad y aceleración de vibración de los puntos de la cuerda.
d) La distancia mínima que separa dos puntos de la cuerda, que en un mismo instante, vibran desfasados 2π radianes.
32. Si la velocidad del sonido en el aire es de 340 m/s ¿ cuáles son los valores de la frecuencia fundamental y de los armónicos en el caso de las ondas estacionarias en un tubo de 1m de longitud cerrado por sus extremos? ¿ cuáles son los valores de las longitudes de onda correspondientes a dichas frecuencias? (sepbre 1997)
33. ¿Qué cualidades distinguen entre sí los distintos sonidos ? ¿ cómo dependen dichas cualidades de las magnitudes que caracterizan la onda sonora? (Madrid LOGSE 1996)
34. Las ondas luminosas se propagan en el vacío con una velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s. Halle la longitud de onda que corresponde a una frecuencia de $6 \cdot 10^{10}$ Hz
35. La velocidad de una onda armónica en el aire está dada por $v = \sqrt{CT}$, donde C es una constante y T la temperatura absoluta del aire. Suponga que cuando $T = 100$ K su longitud de onda es λ . Determine el incremento de temperatura necesario para duplicar la longitud de onda. (Madrid, sepbre, 1997)
36. Una fuente sonora puntual emite con una potencia de 10^{-6} W
c) determine el nivel de intensidad expresado en decibelios a 1 m de la fuente sonora.
d) ¿a qué distancia de la fuente el nivel se ha reducido a la mitad del valor anterior? Dato: el umbral de audición es de 10^{-12} W m² (Madrid junio 2002)
37. Dos sonidos tienen una intensidad sonora de 50 dB y 70 dB respectivamente. Calcule la relación entre sus intensidades. (Madrid junio 2000)
38. Una onda armónica que se propaga por un medio unidimensional tiene una frecuencia 500 Hz y una velocidad de propagación de 350 m/s.
a) ¿Qué distancia mínima hay, en un cierto instante, entre dos puntos del medio que oscilan con una diferencia de fase de 60° ?
b) ¿Cuál es la diferencia de fase de oscilación en un cierto punto, para un intervalo de tiempo de 10⁻³ s?
39. Escriba la expresión matemática de una onda armónica unidimensional como una función de x (distancia) y t (tiempo) y que contenga las magnitudes indicadas en cada uno de los siguientes apartados:
a) frecuencia angular y velocidad de propagación
b) período y longitud de onda
c) frecuencia angular y número de onda
d) explique por qué es una función doblemente periódica
40. Uno de los extremos de una cuerda tensa, de 6 m de longitud, oscila transversalmente con un movimiento armónico simple de frecuencia 60 Hz. Las ondas generadas alcanzan el otro extremo de la cuerda en 0,5 s. Determine:
a) La longitud de onda y el número de onda de las ondas de la cuerda.
b) La diferencia de fase de oscilación existente entre dos puntos de la cuerda separados 10 cm.
41. Una onda armónica que se propaga por un medio unidimensional tiene una frecuencia 500 Hz y una velocidad de propagación de 350 m/s.
a) ¿Qué distancia mínima hay, en un cierto instante, entre dos puntos del medio que oscilan con una diferencia de fase de 60° ?
b) ¿Cuál es la diferencia de fase de oscilación en un cierto punto, para un intervalo de tiempo de 10⁻³ s?

MAPA CONCEPTUAL DE VIBRACIONES Y ONDAS MECÁNICAS



6.3 LA OPTICA FÍSICA

Sumario:

- 1.-El Experimentum Crucis más conocido
- 2.-Ondas de luz
- 3.- Interferencias luminosas
- 4.-Películas delgadas: los anillos de Newton
- 5.-El principio de Huygens y Fresnel: reflexión , refracción y difracción con este modelo.
- 6.- La doble rendija simplificada
- 7.- La triple rendija simplificada
- 8.- La rendija simple
- 9.- Polarización de la luz: ángulo de Brewster, polarizador
- 10.-La síntesis electromagnética



fig . 3.1: el prisma de Newton

La Óptica de Rayos, es básicamente una colección empírica de leyes geométricas que dibujan imágenes y trayectorias de rayos sin justificación. *Isaac Newton* (1642-1729), intentó una explicación más profunda e influenciado por las teorías atomistas y el éxito que había obtenido con su teoría de la fuerzas a distancia, pensó en la luz como partículas con extrañas cualidades, que emanaban de un foco en línea recta y que al encontrarse con medios materiales sufrían fuerzas a distancia responsables de las desviaciones observadas en la refracción. Hoy se considera que sus explicaciones iniciales del color, aunque erróneas, son el inicio de la Óptica Física.

Casi un siglo después de su muerte, la nueva Óptica Ondulatoria nació de la mente de espíritus inquietos a quienes no satisfacía el modelo del respetado maestro. Young y Fresnel , propusieron que una naturaleza

ondulatoria de la luz explicaba lo que el modelo de Newton dejaba confuso: la difracción, la polarización, o los colores de las manchas de aceite en el suelo del asfalto durante los días lluviosos.

Más tarde, otros gigantes como Maxwell y Hertz, ensancharon el camino hacia una teoría de ondas electromagnéticas que se acordó en llamar la Óptica Física. Cuando parecía definitiva, nuevas dudas dieron lugar a la Óptica Cuántica de la luz. Parece ahora definitiva pero la historia de la ciencia nos enseña a ser precavidos con los dogmas...

EL EXPERIMENTUM CRUCIS DE LA OPTICA

Para el científico *Newton*, ya en su juventud, la construcción de mejores telescopios presentaba dificultades insolubles, debido al fenómeno ya comentado.

Tras exhaustivos intentos de modificar las calidades del vidrio y la geometría de las superficies, Newton decidió que era imposible encontrar una lente acromática, por lo decidió la construcción de un telescopio a base de espejos que no tuviera la servidumbre de las lentes. Un espejo central cóncavo recogía los rayos paralelos que reenviaba a uno plano, para ser recogidos por un ocular transversal al eje. Con un tamaño mucho menor que los refractores de igual tamaño, conseguía evitar las incómodas aberraciones cromáticas. Una vez hubo enviado dos ejemplares a la Royal Society, su conocimiento por la comunidad científica europea, le supuso el reconocimiento inmediato a su talento.



fig . 3.2 Telescopio reflector de Newton

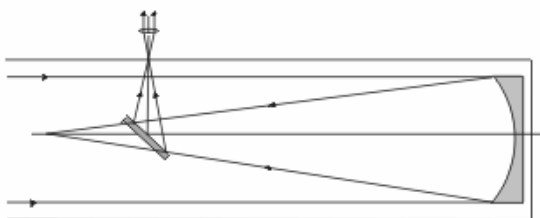


fig . 3.3 Diseño interior del telescopio reflector

Enfrentado a un problema de índole puramente tecnológica como era la mejora de la eficacia de los telescopios, Newton encontró mucho más interesante el estudio del color que el de optimizar estos instrumentos, y a partir de entonces es donde él acota sus investigaciones, con un doble objetivo: descubrir el origen de su aparición a partir de la luz blanca, y desentrañar las leyes de su comportamiento. Con ello descubrió una parcela nueva de la ciencia que hoy convenimos en llamar la Óptica Física, y, además, comenzó a hacer ciencia moderna donde la respuesta a las explicaciones difíciles se buscaba a en las *causas ocultas*.

En el que se ha definido como el Experimentum Crucis más famoso de la Historia, Newton diseñó un montaje en el que la luz solar que atravesaba el agujero de una ventana, y se analizaba a su paso por dos prismas consecutivos, y una rendija (fig 3.6)

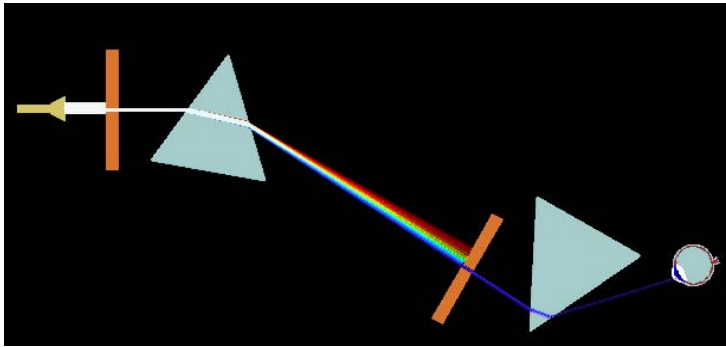


fig . 3.4 El Experimentum Crucis

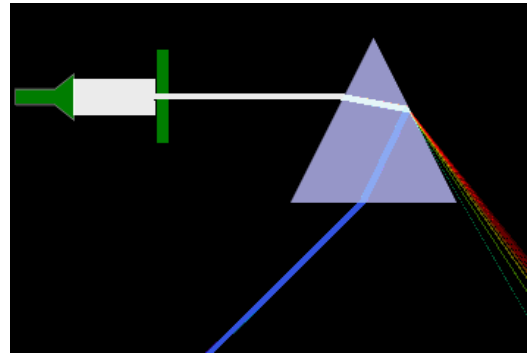


fig . 3.5 Selección de color simple

En ausencia de focos de luz intensos, Newton aprovechaba la propiedad de que el ángulo límite de los distintos colores es distinto, para así seleccionarlos a voluntad a medida que se giraba el prisma .

El Experimentum intentaba decidir entre dos teorías igualmente válidas en principio: la de Descartes, que aseguraba que la luz blanca es pura, y que los colores que aparecen a su paso por un prisma son modificaciones que sufren sus corpúsculos en su impacto contra el vidrio, o bien la defendida por Newton, que aseguraba que la luz blanca sólo es una mezcla de varios colores.

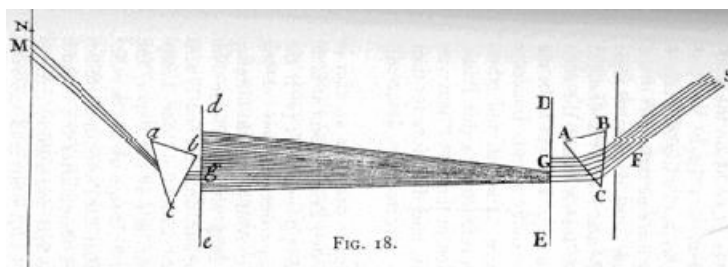


fig . 3.6 El Experimentum en Opticks

Su experiencia no dejaba lugar a dudas: el primer prisma desviaba ángulos distintos cada color formando una imagen policromada mucho mayor que el objeto, a pesar de se hacía incidir los rayos según el conocido ángulo de mínima desviación, y, si se seleccionaba uno solo haciéndolo pasar través de un segundo prisma, de ser válida la primera teoría, el prisma lo modificaría de nuevo, pero lo que ocurría es que lo mantenía intacto. Era entonces evidente que los colores ya son parte integrante del rayo inicial, y lo único que consigue el prisma es desviarlos un ángulo diferente para cada color. Además, si cada color desviaba un ángulo distinto, su índice de refracción también debía serlo, luego sus velocidades dentro del medio serían función del color. Recién publicada su obra maestra *Principia Matemática* que postulaba fuerzas de atracción a distancia entre la materia, sugería como hipótesis no forzosamente cierta¹, que el medio denso atraía hacia sí a los corpúsculos de luz, con fuerza variable dependiendo de su tamaño y velocidad, lo que incrementaba su velocidad respecto al aire. La ley de Snell habría que enunciarla para cada color, al que habría que asignar un índice de refracción n .

Newton utilizó esta propiedad de que las imágenes que inciden según este ángulo, no salgan deformadas, para afirmar que el hecho de que una imagen circular de luz blanca , se convierta en otra alargada policroma a pesar de que la incidencia sea según este ángulo ,es debido a la no homogeneidad de la luz blanca. Otra aplicación de ello se hace en los espectrómetros , donde para evitar deformaciones de las imágenes , las

¹ Realmente, Newton separa muy bien lo para él son leyes de las hipótesis, por lo que no le importa proponer varias en intentos sucesivos de acercarse a la realidad. La sección "Queries" de su *Opticks*, está dedicada a hipótesis abiertas a futuras generaciones.

radiaciones incidentes se hacen llegar según dicho ángulo. Newton atribuía a corpúsculos de distintos tamaños y velocidades en un principio lo que le llevó a no pocos enfrentamientos² con su contemporáneo Robert Hooke.

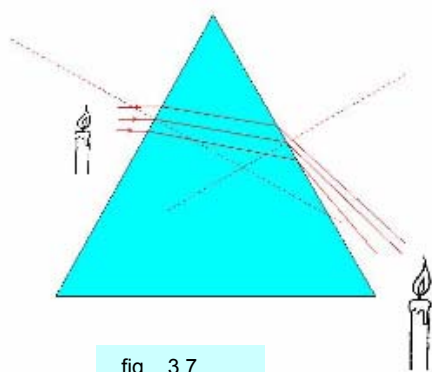


fig . 3.7

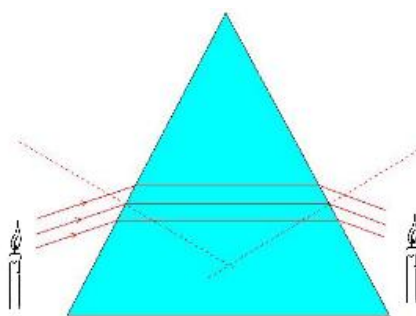


fig . 3.8

Contexto histórico



Los fundadores

Explicar en qué consistía la luz en las épocas de la Revolución Científica y anteriores era un desafío excesivo para su tiempo, y los dos protagonistas de esta aventura, Newton y Huygens, eran conscientes de ello. Al contrario que sus contemporáneos y seguidores más mediocres, sus tesis no fueron dogmáticas y reconocieron sus dudas abiertamente.

El Newton que nos ha legado la Historia de la Ciencia, al que se le atribuye una concepción corpuscular de la luz frente a la ondulatoria de Huygens, es una caricatura del real. Frente a dos hipótesis igualmente plausibles, Newton prefería priorizar el conocimiento de los hechos a las explicaciones basadas en causas no observables, y sólo a modo de ilustración, propone las hipótesis abiertas. Es conocida su frase “*hipótesis non fingo*” en la que intenta huir de los errores de Descartes. De hecho, cuando observa la periodicidad de los anillos que llevan su nombre formados por las películas de aire entre dos lentes, ya piensa en la posibilidad ondulatoria de la luz pero la descartó alegando que ello supondría desviaciones de la trayectoria recta que nunca observó (Newton ya era presbita cuando analiza la difracción). Prefirió en su lugar asignar propiedades que llamó “*fits*” a los supuestos corpúsculos¹. En contra de lo que se piensa, al final de su vida, defendía la existencia de un éter muy liviano, que impregnaba todo el Universo y coexistía con los corpúsculos que emanaban los cuerpos luminosos. Salvando todas las distancias, se le puede comparar a los pioneros de las actuales teorías onda-corpúsculo como reconocen autores de la talla de Albert Einstein o Richard Cohen.

También se ha divulgado otro error con Chrystian Huygens, pues tampoco fue un defensor de las ondas periódicas como él mismo dice explícitamente. Es cierto que postula la existencia del éter como un medio que transmite los impulsos de los cuerpos luminosos del mismo modo que lo hacen un grupo de varias bolas de billar en contacto a las que llega un impacto sobre una de la periferia. Estos impulsos, no necesariamente periódicos, que nacen en los diferentes focos de una llama, se agrupan en un frente del impulso. Cuando golpean a las partículas del medio, éstas lo reemiten en varias direcciones radiales pero sus efectos sólo se perciben en la dirección del rayo porque se refuerzan de nuevo y ello explica que para él también, *la luz viajaba en línea recta*. Por tanto, tampoco detectó la difracción aunque su principio, que retomó Fresnel 100 años después, sí la explicaba.

El modelo ondulatorio de la Óptica Física, se demostró mucho más general que el corpuscular, y lo seguimos utilizando para explicar la mayoría de los fenómenos ópticos. En lo que sigue de la unidad, lo adoptaremos a menos que se diga lo contrario.

² FS. Historias de Óptica.



EL PRIMER EXPERIMENTUM CRUCIS DE LA CIENCIA

Objetivos : Diferenciar los colores primarios que utilizan los artistas de los siete colores del espectro visible . Proponer un modelo para la luz blanca

Materiales: dos prismas Crown, una rendija de 1mm , bases soporte con nueces, varillas soporte y plataformas, pantalla blanca, retroproyector, cartulinas.

Montaje y observaciones:



Un retroproyector proporciona un haz estrecho de luz blanca si se interpone una rendija hecha con cartulina. El haz de luz blanca a su paso por el primer prisma se recoge en una primera pantalla en la que se ha practicado un rendija estrecha. A continuación, un segundo prisma sólo desvía la trayectoria de la luz roja pero no su color en contra de lo que aseguraba Descartes.

Cuestiones:

- ¿Cómo argumentaba Descartes la aparición de los colores en un prisma?
- ¿De dónde viene el origen del término Experimentum Crucis?
- ¿Cómo justificaba Newton la aparición del color rojo en el segundo prisma?
- ¿Cuál fue el motivo del conflicto entre el joven profesor Newton y el consagrado científico, arquitecto y socio de la Royal Society Robert Hooke?
- Newton proponía un modelo atómico para la materia y, con más reservas, para la luz. ¿En qué consistía?
-

Actividades complementarias:

- Comprueba la refracción de la luz blanca en casa incidiendo en distintas posiciones la luz de un foco de luz blanca sobre una jarra con agua.
- Repite la observación con un puntero laser de luz roja o verde (¡no apuntarlos a los ojos!)
- Intenta la observación del *rayo verde* con la linterna de modo que el rayo provenga desde abajo

Elabora un informe con una extensión mínima de tres folios respondiendo a las cuestiones y los resultados de las actividades complementarias. Puedes consultar Internet u otras fuentes.

fig . 3.9

ONDAS DE LUZ

Tras la revolución científica iniciada por Young, la Óptica actual ha asentado de modo prácticamente definitivo, que la luz tiene una naturaleza doble, y aunque lo iremos justificando a lo largo de estas líneas, es conveniente familiarizarse cuanto antes con algunas de las conclusiones a las que ha llegado la comunidad científica tras no pocos esfuerzos.



fig . 3.10

- En determinadas circunstancias, la luz se comporta como una onda electromagnética transversal a la dirección del movimiento que transporta la energía mediante la propagación simultánea de una perturbación eléctrica y otra magnética. Ello se traduce por ejemplo en que a su paso por rendijas estrechas, el haz se abre en frentes de onda cilíndricos cuyos puntos tienen idéntica fase y decimos que la luz ha sufrido una *difracción*.
- En otras, su comportamiento es *corpúscular* . En su interacción con pantallas de CCD , o superficies de metales fotosensibles, se detectan paquetes pequeños de energía ,como fotones individuales de distintas energías que se asocian a los distintos colores de la onda que les acompaña.
- Las experiencias más precisas han sido hasta ahora incapaces de detectar la presencia de ningún *éter* que las soporte. Es más, en el vacío estas ondas o corpúsculos viajan más rápido que en cualquier otro medio. La Óptica Física es la que explica esos comportamientos.
- Cuando aparece uno de estos comportamientos, el otro permanece oculto. Nunca se presentan los dos a la vez en el mismo experimento.

Michael Faraday ya buscaba en sus líneas de fuerza de las perturbaciones magnéticas y eléctricas una manifestación de un medio por donde viajaban más fácilmente. Cuando James Maxwell amplía la teoría, descubre sus ondas electromagnéticas estaban formadas por una perturbación vectorial eléctrica que podía mover electrones a su paso, y otra magnética, susceptible de actuar con imanes atómicos, ambas periódicas en el tiempo y el espacio. Aunque no necesitaba de un éter como medio, siguió apoyando su existencia.

La teoría electromagnética incluye a la luz, y aunque es un modelo más riguroso, en todo lo que sigue de esta unidad, trataremos la luz como una de estas ondas, de la que sólo nos interesará el vector **E**, pues ello será suficiente para interpretar la mayoría de los tópicos de la Óptica Física.

Las mareas de Bastha

Contexto histórico



Hacia falta una intuición fuera de lo común para explicar un fenómeno que relataba el viajante Francis Davenport en 1684. Según consta en un acta a las Philosophical Transactions de la Royal Society, el comercio con la ciudad de Hanoi en Vietnam, había quedado bloqueado por una barra de arena a la salida del río y un hecho inaudito lo complicaba aún más: en estas aguas nunca hay más de una marea al día, y dos veces al mes lunar, a intervalos de catorce días, no existía ninguna marea. El fenómeno atrajo de inmediato la atención del astrónomo Halley y de Newton que lo analizó en sus Principia, donde lo atribuye de modo correcto al hecho de que en su viaje hacia la costa, las mareas interceptadas por la isla de Tonkin producían dos corrientes de recorridos distintos que a su llegada al citado puerto producían interferencias destructivas. Dado que su desfase era de seis horas, cuando la intensidad de ambas era máxima, sus efectos se anulaban dando lugar al referido fenómeno.¹



fig . 3.11



fig . 3.12

En su intento por explicar la aparición de colores en las delgadas láminas de aceite sobre los charcos, Thomas Young, que ya conocía el fenómeno de las mareas de Bastha, intentó explicar primero que el principio de superposición (que tan bien conocía en las ondas de agua que generaba en su cubeta de ondas) podía explicar las interferencias, argumentando que en el lugar en que encuentran dos pulsos viajando en direcciones distintas se produce una perturbación suma de ambas, pero al seguir cada una su camino, las perturbaciones siguen su camino independientemente.

De otro lado el fenómeno de las pulsaciones era aún más complejo: cuando dos diapasones de frecuencias levemente distintas, suenan al unísono, aparece un tercer sonido de una frecuencia $\lambda = (\lambda_1 - \lambda_2) / 2$. Mientras que Thomas Young lo explicaba como un claro ejemplo de interferencia sonora, otros científicos lo veían como una percepción mental de nuestro cerebro. Como la calidad de los instrumentos de medida de la época era muy deficiente, bloqueó su interpretación hasta mediados del XIX.

Su contemporáneo Huygens se asombraba de dos miradas se pudieran enfrentar sin que sus emanaciones visuales interfirieran entre ellas, o de que dos haces de luz de colores distintos que se cruzaban en un punto, pudieran continuar su camino sin modificarse del mismo modo que las ondas de agua mantiene su independencia una vez que se han cruzado en un punto. Un modelo de corpúsculos no podía explicarlo.

Sólo hasta principios del siglo XIX, los científicos Young y Fresnel reunieron las suficientes evidencias experimentales y la preparación matemática para apostar por un modelo ondulatorio de la luz. Ésta sería pues una perturbación vibratoria de los átomos que se propaga en un éter óptico en ondas esféricas transversales de modo senoidal, y al encontrarse con nuevos átomos induce en ellos nuevas vibraciones..

Para llegar a la comprensión del proceso mediante el que Thomas Young aplicó este proceso a la luz, es interesante repetir su progresión desde las ondas de agua que producían los cisnes de los estanques de la Universidad de Cambridge, donde estudió Medicina.

Interferencias luminosas

Así como las ondas mecánicas pueden interferir sus acciones en un mismo punto del medio y producir efectos constructivos o destructivos, el comportamiento que presenta la luz a la salida de rendijas estrechas, o se refleja en películas delgadas, tal como la aparición periódica de colores o manchas oscuras, sólo tiene una explicación sencilla si se acepta que su naturaleza es en cierto modo análoga a ellas y que en ciertas condiciones, la diferencia de fase entre ondas que interfieren en un punto se mantiene constante.

Ésta fue la conclusión a la que llegaron los científicos Young y Fresnel trabando de modo independiente, lo que les permitió crear llegar a un nuevo marco para la Óptica comparable al que hizo Newton con la Gravitación. El tratamiento matemático de la nueva ciencia sólo necesitaba un dominio básico de las funciones senoidales y las técnicas que proporciona el Cálculo Infinitesimal para sumar las contribuciones a la perturbación que una infinidad de focos provocan en un punto.

Bastará en todo lo que sigue con considerar la luz como una perturbación periódica transversal a la dirección de propagación, dotada como las ondas mecánicas de período, frecuencia y longitud de onda y amplitud, capaz de perturbar los electrones de los medios que atraviesa e inducir en ellos nuevas vibraciones capaces de generar nuevas ondas. La única diferencia entre ambos fenómenos es que mientras que los trenes de ondas mecánicas se consideran suficientemente largos, los de la luz visible son sumamente cortos (del orden de 3 cm) y ello dificulta la observación de las interferencias luminosas.

Se conviene en llamar *coherentes* a dos rayos que solapan sus efectos e incoherentes a los que llegan tan distanciados que sus actuaciones son independientes.

Las láminas delgadas

Los colores que observaron Newton y Young en su tiempo, en las delgadas láminas de mica, el cuello de las palomas, las pompas de jabón, o las que hoy día vemos en las películas de aceite en el asfalto de espesor variable, son claros ejemplos de las interferencias que producen colores de distinta longitud de onda cuando inciden sobre láminas delgadas de espesor variable. Para un color determinado habrá refuerzo o cuando dos o más rayos coherentes procedentes de un mismo foco, llegan distanciados una longitud de onda e impresionan el mismo punto de nuestra retina o de un objetivo fotográfico al ser focalizados bien mediante el cristalino, bien por el objetivo de la cámara.

Consideramos importante un tratamiento al menos cualitativo de este fenómeno, tanto por razones históricas (supuso el inicio del final de los *fits*) como por sus recientes aplicaciones tecnológicas a tratamientos antireflectores en toda clase de lentes.

El caso más sencillo es del un único rayo monocromático procedente de un foco S que incide en una lámina plana. Un rayo incidente AE sobre la superficie de espesor constante d , si éste y la longitud de la onda son los adecuados, se refleja en la primera superficie y podrá interferir con los que se reflejan internamente tras una o varias refracciones, aunque sólo los dos primeros tienen intensidad apreciable. El segundo al llegar al punto F, sufre un cambio de fase de 180° puesto que el vidrio es más denso que el aire. Al salir de nuevo al aire, ambos pueden interferir y, aunque el cristalino puede concentrar los rayos emergentes paralelos para su observación, ésta se simplifica si colocamos frente a ellos una lente convergente.

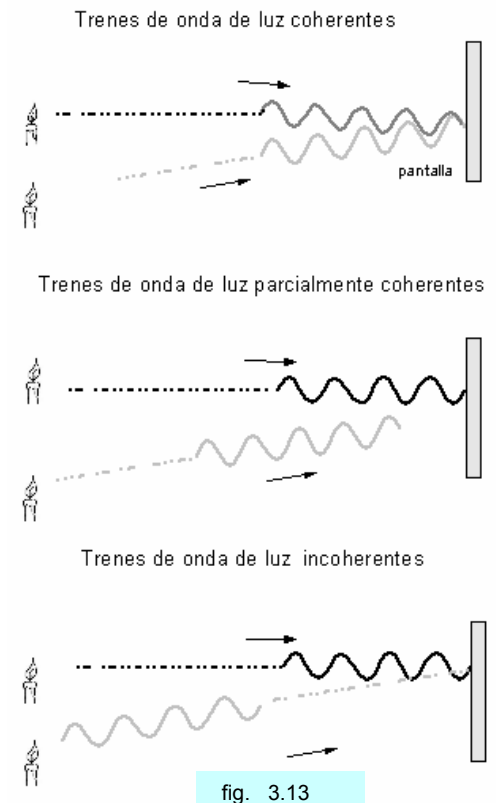


fig. 3.14: Interferencias de aceite en asfalto mojado

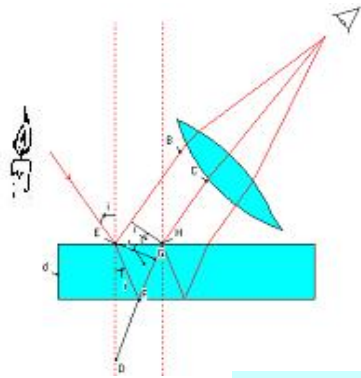


fig . 3.15

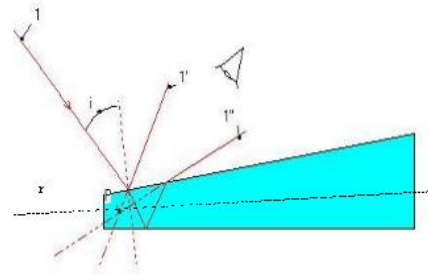


fig. 3.16

En la práctica, un único rayo y la posición de la interferencia hacen prácticamente imposible su observación. Es mucho más familiar el caso de interferencias en láminas delgadas de espesor variable (aceite, mica, interfases de aire,...) con luz difusa de infinitud de rayos e incidencia casi normal.

La fig. 42 muestra el caso de una lámina de espesor variable en la que un rayo 1 produce por reflexión dos rayos 1' y 2' coherentes que un observador puede ver. Si la luz es blanca y éste va barriendo la mirada paralelamente a la lámina, la distancia entre los rayos 1' y 2' irá variando y éste verá las conocidas franjas de las manchas de aceite en el suelo húmedo de las gasolineras.

Tiene especial interés histórico el caso en que la lámina de espesor variable está limitada por dos vidrios superpuestos de modo que uno de los extremos se sujeta con una gomita y en el otro se intercala un papel. Con incidencia casi normal, de rayos monocromos, por ejemplo, se verán alternativamente franjas oscuras y brillantes.

Newton modificó ligeramente esta experiencia sustituyendo los cristales planos por el conjunto de una lente plano convexa montada sobre un vidrio plano. De este modo observaba anillos concéntricos cuyos radios le permitían conocer la distancia que separaba los recorridos de ambos rayos.³

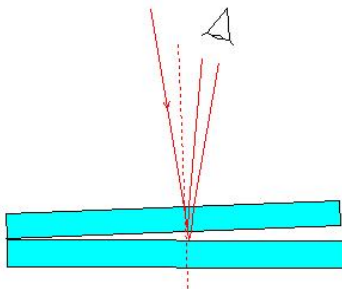


fig 3.17

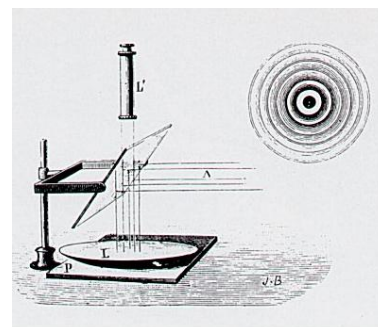


fig. 3.18

³ FS Historia de Óptica Física .



ANILLOS DE NEWTON EN CUÑAS DE AIRE

OBJETIVOS: Visualizar la formación de anillos de Newton creados por un foco de luz blanca extenso en una lámina de aire de espesor variable comprendida entre dos vidrios portaobjetos

MATERIALES: Un vidrio transparente y otro con la cara inferior pintado en negro mate, Una lámpara de sodio de alta o baja presión.

FUNDAMENTOS : Esta experiencia es la clave de la invención de los “fits” (o accesos), que Newton propuso para explicar la aparición periódica de colores en las interferencias producidas cuando rayos paralelos incidían de modo casi normal sobre láminas delgadas. Sin embargo su explicación fue incorrecta y hoy día se explica aceptando que el rayo reflejado en la segunda cara del primer cristal y el reflejado en la primera del segundo (ambos de naturaleza ondulatoria), interfieren en un color concreto cuando su diferencia de caminos es de media longitud de onda. El hecho de que la forma de las franjas sea irregular, nos informa de las irregularidades de las superficies y puede utilizarse para investigar la calidad de mecanizado del vidrio. Si se hace la experiencia con luz monocromática de una lámpara de sodio o un laser la observación es mucho más nítida porque evitamos el solapamiento parcial de los distintos colores como aparece con la luz blanca.

MONTAJE: Para conseguir una cuña de espesor variable se introduce un cartón en un extremo del conjunto de los dos vidrios y el otro se une fuertemente con una gomita de oficina. Colocamos una lámpara de sodio por encima de nuestra cabeza a pequeña distancia y la observación de franjas es inmediata.

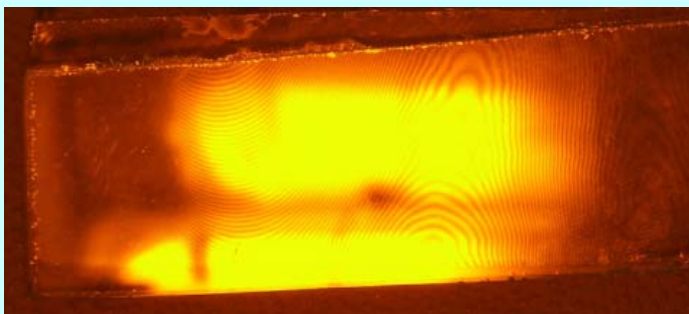


fig. 3.19

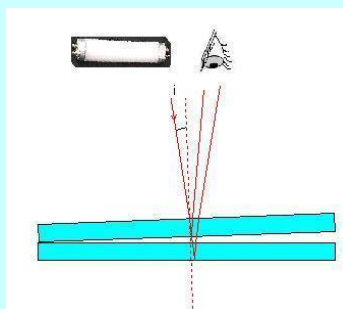


fig 3.20

CUESTIONES Y ACTIVIDADES:

- Introduce un papel en el extremo de la unión de dos portamuestras de microscopio y observa la reflexión resultante cuando se la ilumina desde arriba con luz blanca de un tubo fluorescente.
- Observa la figura que se obtiene cuando se observa la luz transmitida a través de este montaje. ¿Puedes interpretarlo?
- Estima el espesor de la lámina de aire en el lugar de la doble reflexión (puedes estimar el espesor del papel conociendo el de un paquete de 100 folios)
- ¿Cómo relacionó Young los fits de Newton con sus longitudes de onda?

Haz un breve informe con las observaciones, explicaciones y resultado de los informes. Puedes documentarte con el material complementario del CD del curso, Internet, etc.

LA DIFRACCION: EL PRINCIPIO DE HUYGENS- FRESNEL

Si bien es cierto que Young fue el intuitivo precursor de la nueva teoría ondulatoria, sus explicaciones de los fenómenos, eran sólo puntuales y oportunistas a veces. Fue necesario que el francés Augustin Fresnel remozara la antigua hipótesis de Huygens y estableciera que, de modo parecido a como las ondas que aparecen las piedras que caen al agua de un estanque y crean ondas secundarias cuando llegan a pequeñas aberturas, la luz podría ser la perturbación periódica resultado de las agitaciones atómicas sobre un éter muy liviano, que es capaz de provocar nuevas agitaciones y ondas periódicas cuando llega a un nuevo medio material.:



- La luz está constituida por frentes de onda periódicos formados de infinitud de puntos de fase constante.
- La intersección de un plano vertical en la dirección del rayo, da una forma senoidal amortiguada, que se puede aproximar a frentes de ondas planos.
- Cada frente de ondas es el resultado de la interferencia de las onditas secundarias creadas por los innumerables focos del frente anterior.
- Si el frente de ondas queda limitado por un obstáculo que sólo deja pasar un pequeño tramo del frente de ondas, las pequeñas ondas esféricas secundarias se harán visibles. Se dice entonces que hay **difracción** del frente de ondas.

fig. 3..21

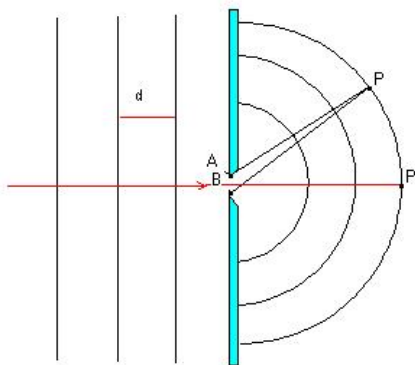


fig 3..22

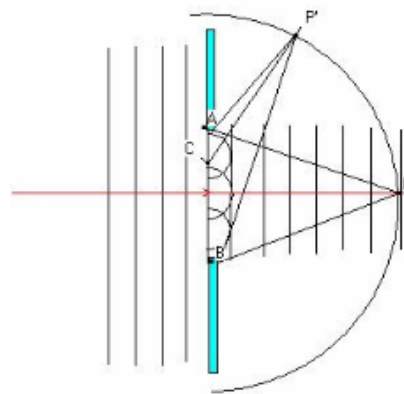


fig 3..23

Es importante entender que este principio explica *todos* los problemas de la Óptica Geométrica y no sólo el caso límite de rendijas muy estrechas. Por lo que debe intentarse su comprensión cualitativa cuanto antes. Niels Bohr enuncia como el **Principio de Correspondencia** el hecho de que un nuevo modelo debe superar las lagunas del modelo anterior y explicar a un nivel más alto todo lo que funcionaba bien.

En el caso de que la rendija sea muy estrecha en relación a la longitud de onda incidente, en donde el falla nuestra Óptica de rayos. Los puntos A y B del mismo frente de ondas al llegar a la rendija están en fase. Si nos fijamos también en un punto P' situado en la pantalla en el eje de simetría, en el que haya un máximo, también lo habrá en todos los puntos de la esfera PP' puesto que la diferencia de caminos $PA - PB$ es mucho menor que la longitud de onda. Las ondas secundarias del frente limitado por AB, interferirán constructivamente en los frentes esféricos.

Si por ejemplo $PB \approx 3\lambda$ $PA \approx 3\lambda$ luego $PA - PB \ll \lambda$

Si la longitud de onda fuera mucho menor que la rendija, $\lambda \ll d$. Si consideramos que el mismo punto P' está en un máximo, resultado de las interferencias constructivas de las onditas secundarias, A,B,C,... al punto P situado en la esfera del mismo radio, llegan ahora contribuciones de infinitud de ondas secundarias cuyas diferencias de camino pasan por todo un abanico de distancias, luego la suma de las contribuciones dará un promedio destructivo. La única zona en la que $PA - PB$ es $\ll \lambda$ es la zona central y es en ella en la que se observarán los máximos y mínimos periódicos. Sólo en este caso, un rayo incidente, perpendicular al frente de onda, se propaga rectilíneamente.

Ya vemos que el problema de calcular el estado de la perturbación en un punto cualquiera, debida a una porción del frente de onda , debe considerar la infinidad de contribuciones de las onditas secundarias y requiere un cálculo complejo que se aborda en otros cursos. Sin embargo el concepto de difracción es idéntico al de las interferencias con la única diferencia del número de focos que se consideran, escasos en las interferencias e indefinidos en esta última.



Vemos pues, que si a es la anchura de la rendija, la clave para decidir si la difracción es o no observable, es el análisis del cociente λ/a . Si es grande se observa la difracción, si es pequeño, aunque la difracción exista en todo el espacio, la interferencia de las onditas secundarias sólo se aprecia como un haz de rayos de sección cilíndrica cuya diámetro a coincide con la anchura de la rendija.

Para Huygens, el científico contemporáneo más respetado por Newton, la luz consistiría en perturbaciones sucesivas del éter , no forzosamente periódicas, cuya velocidad disminuía al cambiar a otro medio de más densidad , pues parecía más lógico que ofreciera una resistencia mayor que el más liviano. Las contribuciones de Young y Fresnel dieron el espaldarazo a las teorías ondulatorias pues explican mejor los fenómenos y predecían nuevos fenómenos.

La reflexión de la luz para Huygens

Los frentes procedentes del aire, al encontrarse con el segundo medio, provocan la aparición de nuevas ondas en los puntos O y P , que al reemitirse hacia el aire viajarán con igual velocidad. Considerando los triángulos iguales $OO'P$ y $OP'P$ con el lado común OP , una sencilla semejanza establece que:

$$\text{sen } i = O'P/OP = vT/OP$$

$$\text{sen } r' = OP'/OP = vT/OP$$

de donde se deduce que $\text{sen } i = \text{sen } r'$ y, finalmente:

$$i = r'$$

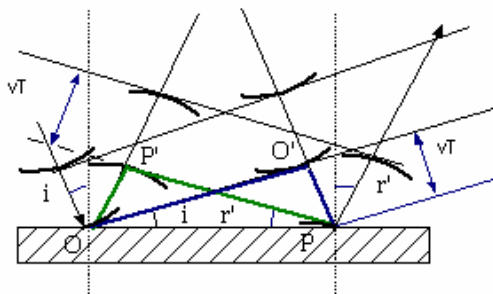


fig 3. 24

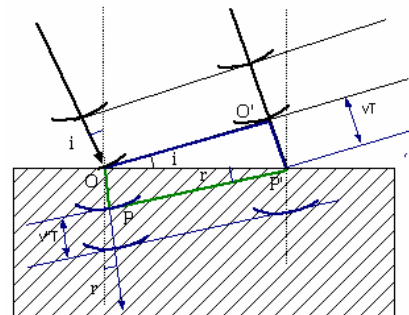


fig 3.25

La refracción con un modelo ondulatorio

Con la hipótesis de que la luz viaja más lenta en los medios traslúcidos que en el aire, Huygens la aplicó a su modelo de frentes de onda para encontrar por otra vía las relaciones conocidas entre los ángulos de incidencia y reflexión.

Si el rayo cambia a un medio más denso, las ondas reemitidas tendrán un radio menor y en el tiempo T su recorrido $v'T$ será también menor. Cuando la ondita que nace en P ha recorrido el espacio OP , la que nace en su homólogo O' lo habrá hecho un recorrido:

$$O'P = vT \Rightarrow OP = v'T$$

Esto condiciona que los nuevos trenes de onda estén más próximos, y además, que se doble la trayectoria por lo que el rayo refractado formará ahora un ángulo r con la normal menor que el de incidencia.

Los triángulos $OO'P$ y OPP' ahora no son iguales pero tienen un lado común, lo que permite las siguientes relaciones:

$$\text{sen } i = O'P/OP \qquad \text{sen } r = OP/OP' \quad \Rightarrow$$

$$OP = \text{sen } i/O'P = \text{sen } r/OP' \quad \Rightarrow \quad \text{sen } i/vT = \text{sen } r/v'T \quad \Rightarrow \quad \text{sen } i/v = \text{sen } r/v'$$

y si definimos una constante $n = c/v$ característica de cada medio y la longitud de onda, donde c es la velocidad de la luz en el vacío, que llamaremos *índice de refracción*

$$n_1 = c/v = 1. \quad n_2 = c/v'$$

Multiplicando los dos miembros de la igualdad por c :

$$c \text{ sen } i/v = c \text{ sen } r/v'$$

$$n_1 \text{ sen } i = n_2 \text{ sen } r$$

Que vuelve a ser la misma ley basada en una hipótesis distinta.

Por otro lado, sabemos que la longitud de onda λ su velocidad en el medio, v , el período T y la frecuencia ν están relacionadas

$$\lambda = v T = v/\nu$$

Al cambiar el medio también lo hace la longitud de onda pero no el período ni la frecuencia, luego si c y λ_0 son la velocidad de la luz y la longitud de la onda en el aire, se obtiene la nueva relación:

$$T = v = \lambda_n/c = 1/\nu$$

A partir de aquí es posible la resolución de nuevos problemas de dispersión en superficies planas y prismas con medios traslúcidos

ejemplos resueltos

Ejemplo 1:

Un rayo de luz amarilla de una lámpara de sodio, tiene una longitud de onda en el vacío de 589 nm. Determinar:

a) su frecuencia b) su velocidad de propagación, y su longitud de onda en el interior de una fibra de cuarzo, cuyo índice de refracción es $n = 1,458$.

Solución:

- a) $\lambda = c \cdot T = c/\nu \Rightarrow \nu = 5,09 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.
 b) $n = c/v \Rightarrow v = c/n \Rightarrow v = 2,05 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
 c) Ahora, $\lambda' = v \cdot T' = v \cdot T = v/\nu = 3 \Rightarrow 92,6 \text{ nm}$

Ejemplo 2

Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de 30° .

- a) qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul componentes de la luz blanca si los valores de los índices de refracción del vidrio para estos colores son respectivamente $n_1 = 1,612$ y $n_2 = 1,671$
 b) ¿cuáles son los valores de la frecuencia y de la longitud de onda correspondientes a cada una de estas radiaciones en el vidrio si las longitudes de onda en el vacío son respectivamente $\lambda = 656,3 \text{ nm}$ y $\lambda = 486,1 \text{ nm}$?

Datos: velocidad de la luz en el vacío, 300.000 km/s

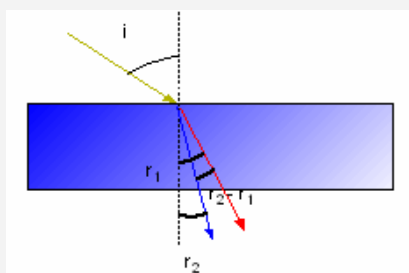


fig 3..26

- a) De la aplicación de la ley de Snell sucesiva: $n_1 = 1,612$ y $n_2 = 1,671$ $n_1 = 1,612$ y $n_2 = 1,671$

$$\begin{aligned} 1. \sin 30^\circ &= n_1 \cdot \sin r_1 \Rightarrow r_1 = 18^\circ \\ 1. \sin 30^\circ &= n_2 \cdot \sin r_2 \Rightarrow r_2 = 17,4^\circ \\ r_2 - r_1 &= 0,6^\circ \end{aligned}$$

- b) como $v = c/n \Rightarrow v_1 = c/n_1 = 1,86 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ y $v_2 = c/n_2 = 1,79 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

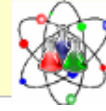
- b) las frecuencias en el vacío serán las mismas que en el medio
 $\nu_1 = v_2/\lambda_1 = 4,57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ y $\nu_2 = v_2/\lambda_2 = 6,17 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

- c) las longitudes de onda $\lambda'_1 = v_1/\nu_1 = 406,89 \text{ nm}$
 $\lambda'_2 = v_2/\nu_2 = 290,89 \text{ nm}$

Ejemplo 3

Más a menos densidad óptica, aparece el fenómeno del ángulo límite. Si en una posición inmediata se ven los rayos reflejado y transmitido, ¿a dónde va la energía del rayo reflejado?

Según aumenta el ángulo de incidencia, las energías de los rayos reflejado y refractado no se distribuyen por igual, sino que la proporción relativa aumenta a favor de éste último. Inmediatamente antes del límite, la intensidad reflejada ya era casi imperceptible. El francés Fresnel ya demostró este fenómeno con su modelo ondulatorio.



El índice de refracción

Las experiencias de Young permitieron medir la longitud de la onda de los colores visibles. Poco después, las medidas de los franceses Foucault y Fizeau, confirmaron que la velocidad de la luz en los medios materiales era menor que en el aire, una intuición que ya había tenido el también francés Fermat. A partir de entonces, el índice de refracción tomó un sentido físico más profundo que la simple constatación de la desviación de la luz al cambiar de medio de distinta *densidad óptica*.

La teoría ondulatoria electromagnética propone que las cargas externas de las moléculas del medio están sometidas a fuerzas de enlace de atracción elásticas y tienen por ello asociada una frecuencia natural de vibración llamada de *resonancia*. Cuando las alcanza el vector eléctrico de la onda incidente, induce en ellas una vibración armónica forzada de igual frecuencia, que produce a su vez una nueva onda secundaria cuya amplitud y desfase es función del alejamiento de la frecuencia incidente respecto a la de resonancia del sistema. La onda final es suma de la incidente y las secundarias y resulta desfasada respecto de la inicial

La posición de los nuevos máximos y mínimos en el tiempo y el espacio, determina la nueva velocidad y la nueva longitud de la onda. Se puede justificar por tanto que el índice de refracción del medio dependa de la longitud de la onda además de las características de éste.

Nuevas investigaciones con iluminación laser han revelado que el índice de refracción cambia de valor cuando la intensidad de la luz aumenta sensiblemente.

INTRODUCCIÓN A LA DOBLE RENDIJA

La que ha sido reconocida recientemente como *la experiencia más hermosa de la física* es considerada como el Experimentum Crucis que decidió definitivamente la adopción del modelo ondulatorio de la luz.

El montaje inicial de Young en 1801, sólo constaba de una vela próxima a una pantalla como foco, una estrecha rendija tras la que el haz se abría como consecuencia de la difracción, y a continuación, dos rendijas muy estrechas y muy próximas entre sí tras las que se observaba una franja central ancha de luz blanca alternada de franjas multicolores separadas por franjas oscuras. La función de la primera rendija era la de abrir el haz lo suficiente para que al llegar a la doble rendija, se obtuvieran dos focos coherentes capaces de interferir en la citada pantalla (o en la retina de un observador).

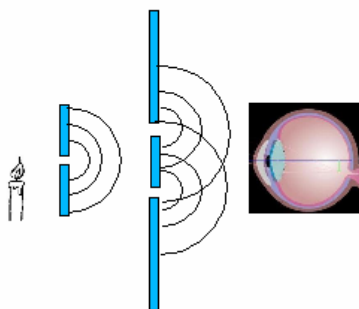


fig 3..27

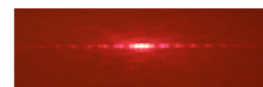
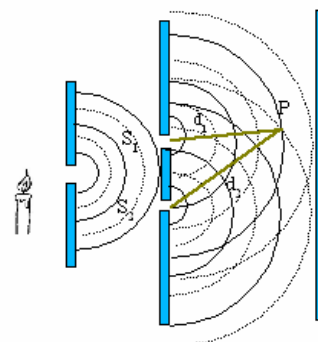


fig 3.28

Si se repetía la experiencia interponiendo un filtro, la luz monocromática resultante se disponía del mismo modo. En la actualidad es más cómodo repetir la experiencia iluminando con un laser rojo, puesto que su gran intensidad permite la observación directa sobre una pantalla.

La explicación se acuerda con el modelo matemático que adoptamos para las interferencias de dos focos S_1 y S_2 que vibran en una superficie de agua.

Es sencillo percatarse de que si en un punto P, la diferencia de caminos $d_2 - d_1$ es número entero de longitudes de onda, la interferencia será un *máximo* y se verá una mancha brillante monocroma.

$$d_2 - d_1 = a \sin \varphi = n \lambda \quad (\text{donde } n = 0, 1, 2, \dots)$$

y como $\sin \varphi = h/D$, podemos calcular la longitud de onda tomando por ejemplo los datos del primer **máximo** distinto del central

$$\lambda = a \sin \varphi$$

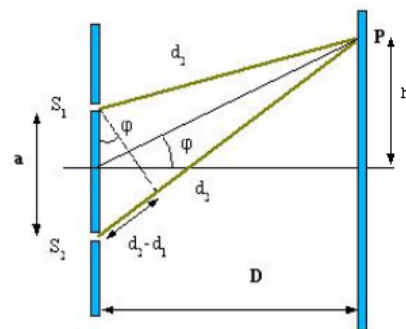


fig 3..29

Si al contrario, esta diferencia es fuera un número de semilongitudes de onda, la perturbación será un **mínimo**, es decir una zona oscura en la pantalla, y

$$d_2 - d_1 = a \sin \varphi = (2n + 1) \lambda / 2 \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$



INTERFERENCIAS DE YOUNG CON UN CABELLO

Objetivo: estimar longitud de onda de la luz roja con una fuente no coherente lejana.

Materiales: Vela, diafragma en marco de diapositiva, cabello pegado a marco de diapositiva y base de madera con rendijas.

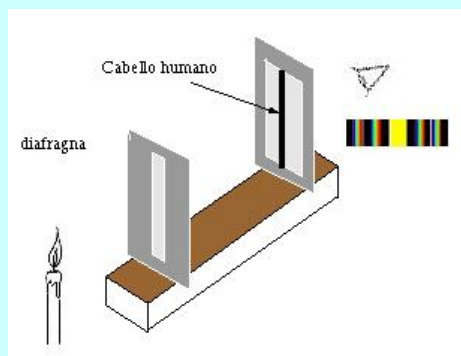


fig 3..30

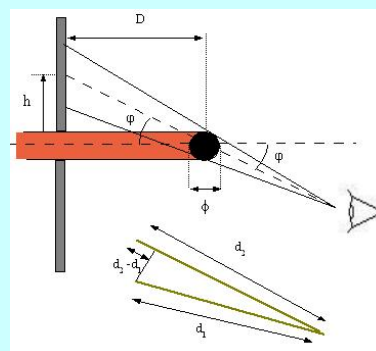


fig 3.31

Fundamentos:

Esta experiencia es una variante de la doble rendija, también ideada por Young, aunque menos precisa. De hecho si a la doble rendija se le suprimen las dos superficies externas, sólo quedaría el estrecho marco central, análogo a nuestro cabello.

Conocido el diámetro del cabello, Φ y midiendo las distancias D del cabello al diafragma y h del centro del marco a la posición del diafragma en la que se ve la primera franja roja, se calcula φ , y a continuación la longitud de onda

$$\Phi \sin \varphi = n \lambda$$

Interferencia con tres y más rendijas

Cuando el número de rendijas es mayor que dos, la figura de interferencia se va modificando de modo que, aunque los máximos iniciales aparecen en las mismas posiciones, su intensidad aumenta a la vez que se hacen más estrechos, así como aparecen nuevos máximos secundarios entre ellos de intensidad mucho más débil. Aunque su cálculo desborda los propósitos de este capítulo, consideramos importante tratar cualitativamente estos casos, pues son la base de las rendijas de difracción.

Para tres rendijas distanciadas también a , la luz coherente que llega a ellas desde O se difracta de nuevo desde cada una de ellas. En un punto P de la pantalla, se recogerá las interferencias de los tres rayos indicados. La condición para que en ellos aparezca un máximo es que las diferencias

$$d_2 - d_1 = d_3 - d_2 = a \sin \varphi = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$$

y para un mínimo:

$$d_2 - d_1 = d_3 - d_2 = a \sin \varphi = \lambda/2, 3\lambda/2, \dots$$

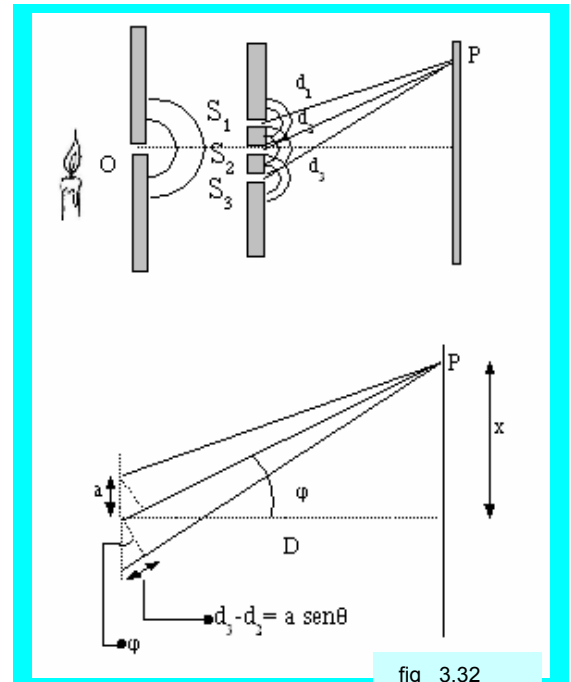


fig 3.32

La composición resultante de las ondas provenientes de los tres focos será la interferencia resultante de la suma

El cálculo de la amplitud resultante en O es función del tiempo y se hace con el algoritmo del vector giratorio, en el que se asocia cada amplitud máxima con vectores de módulo A y fases iniciales $0, \delta$ y 2δ que giran en sentido antihorario con velocidad angular ω . La perturbación de cada rendija en P en función del tiempo, será la proyección de cada radio vector sobre el eje vertical

$$\begin{aligned} E_1 &= A \sin \omega t \\ E_2 &= A \sin (\omega t + \delta) \\ E_3 &= A \sin (\omega t + 2\delta) \end{aligned}$$

Donde δ es el desfase $d_2 - d_1 = d_3 - d_2$ entre dos rayos consecutivos.

La amplitud resultante, suma de las tres, alcanzará máximos principales en los mismos puntos de la pantalla que se obtenían en una doble rendija de igual espacio d , pero aparecerá un nuevo máximo secundario de menor intensidad en una posición intermedia.

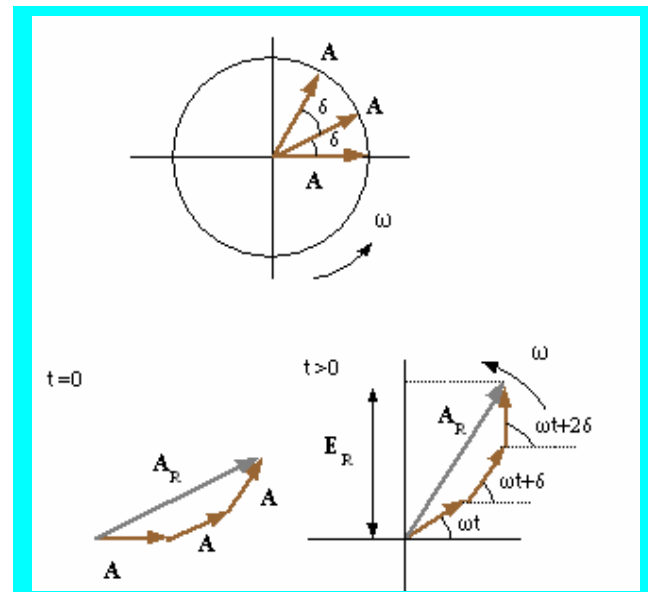


fig 3.33

Aunque su cálculo riguroso necesita del cálculo integral, se puede justificar por consideraciones geométricas sencillas la aparición de estos nuevos máximos.⁴

En la fotografía adjunta aparecen las interferencias resultantes de una doble y una quintuple rendija, suficientemente estrechas para que los efectos de difracción de cada una de ellas no sean apreciables.⁵ Nótese que en esta última los máximos secundarios son inapreciables y que los principales han incrementado su brillo, lo que indica que la energía se redistribuye en ellos. Es de destacar que la posición de estos máximos depende de la longitud de onda de la luz empleada, más distanciados del centro de la pantalla los de la luz roja que los de la luz azul, de menor longitud de onda.

⁴ Física 3ª edición, Paul A. Tipler. Ed. Reverté

⁵ Fotografías tomadas de Optics. Benjamín Cromwell

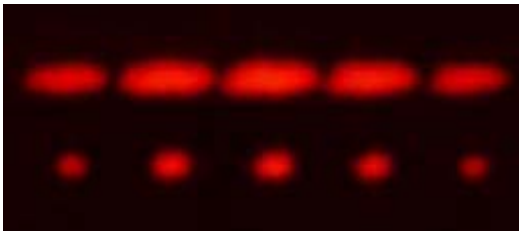


fig 3.34



fig 3.35

Ya estamos en condiciones de comentar el fundamento de las redes de difracción, construidas por infinidad de rayas muy próximas paralelas entre sí (del orden de 600 rayas/mm) , marcadas con un diamante sobre un cristal . La luz que atraviesa los espacios no rayados (o que se refleja en ellos) ,constituye la infinidad de focos secundarios que proporcionan el espectro de la luz empleada. Si el foco es una mezcla de varias luces, la red los separará en distintos máximos muy localizados de distintos colores que aparecerán a ambos lados del máximo central de la pantalla, el único en que las luces no se escinden.

La aplicación de este principio a la identificación de los elementos integrantes de cualquier gas sometido a una diferencia de potencial suficiente para proporcionar un espectro discontinuo cuando se observa a través de una red, continúa siendo la herramienta fundamental para el análisis de los elementos constituyentes de las estrellas, atmósferas de planetas, materia interestelar, etc.

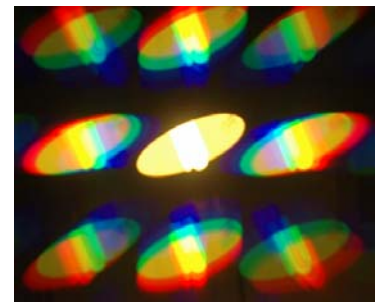


fig 3.36: Imágenes con dos redes de difracción cruzadas.

Difracción en una rendija sencilla

En los desarrollos anteriores hemos obviado el hecho de que en todas las rendijas, como se consecuencia de la difracción, además de abrirse el haz, la distribución de intensidad varía desde un máximo central y se produce también otra secuencia de máximos y mínimos distinta de la interferencial. Aunque su estudio riguroso necesita del cálculo integral⁶, es fácil un razonamiento intuitivo del fenómeno que no lo necesita.:

Ahora sí importa la anchura **a** de la rendija , de la que salen *infinitud* de focos coherentes. Si los agrupamos por parejas S_1 S_2 , S_1 ' S_2 ' ,... de modo que entre cada pareja haya siempre la distancia $a/2$., en un punto P de la pantalla estará habrá el primer un mínimo siempre que la diferencia de caminos sea media longitud de onda:

$$d_2 - d_1 = \lambda/2 = a/2 \sin \varphi$$

$$\sin \varphi = \lambda / a$$

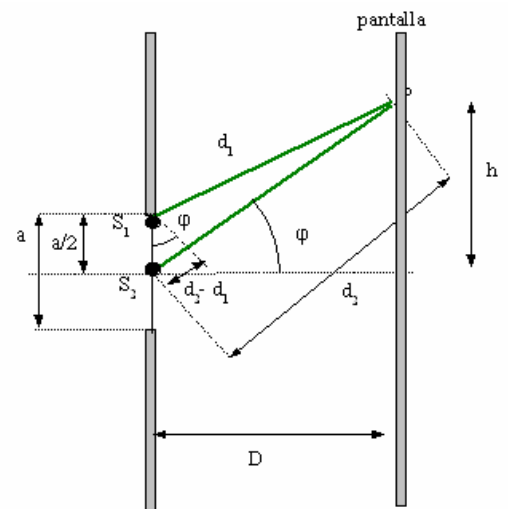


fig . 3.37



Podemos resumir que el cociente indicado, (λ / a) ,es un índice del grado de difracción que se obtiene con una rendija. Grandes longitudes de onda o pequeñas rendijas dan ángulos grandes y por tanto aperturas apreciables

⁶ Lecturas de Óptica II. FS

Un estudio de la intensidad de la luz en los puntos de la pantalla, excede los niveles de este trabajo, pero se demuestra que decae rápidamente desde el centro según la gráfica adjunta. Es muy sencillo observarla con puntero Laser que apunta a una rendija estrecha (basta el espacio entre dos dedos muy juntos)



fig. 3.38 Rendija de anchura variable



fig 3.39 difracción en rendija

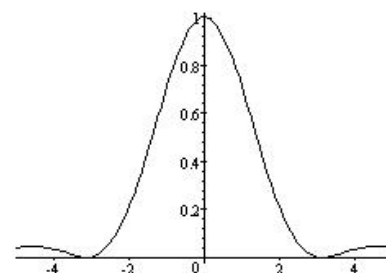


fig 3.40 Curva de intensidad

Un estudio completo de la doble rendija debería tener en cuenta la superposición de los efectos de difracción en cada rendija individual, y de las interferencias de los focos procedentes de cada una de ellas, cosa que hacen textos superiores.

Poder separador de los instrumentos ópticos

Debemos insistir en que la difracción no es un fenómeno puntual sino que, como vió Fresnel, aparece siempre. Sus efectos son observables (e incómodos) cuando una rendija o diafragma se hacen estrechos y con ello el frente de onda a analizar se hace limitado y la imagen se ensancha. Es por la difracción por lo que al entreabrir los párpados frente a un foco de luz, observamos irisaciones y destellos.

Si se observan dos estrellas distintas muy próximas por un telescopio cuyo objetivo sea estrecho, sus imágenes se ensanchan y, además de verse como una serie de círculos concéntricos, pueden solapar con lo que desaparece toda la nitidez. Por esta razón los objetivos de los telescopios a los que pedimos muchos aumentos se hacen lo más ancho posible para minimizar sus efectos.

focos puntuales

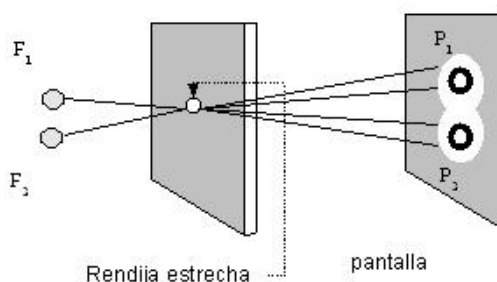


fig 3.41

focos puntuales

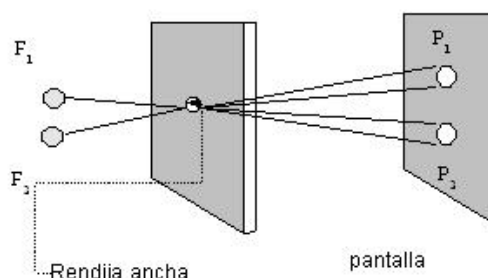


fig 3.42

La difracción en fenómenos cotidianos

Aunque a la luz del día la luminosidad ambiental dificulta su observación, este fenómeno aparece en cuanto un haz de luz atraviesa orificios estrechos como los que aparecen entre las hojas de los árboles, las minúsculas gotas de humedad que forman los halos coloreados al observar algunas noches la luna, cuando dejamos los ojos entreabiertos al observar un foco de luz, cuando la luz del sol se refleja en las pequeñas rayas de los cristales de los coches, o cuando la luz blanca se refleja en su espectro multicolor en un CD.

Su observación precisa exige de buena de visión, como lo demuestra el hecho de que Newton sólo apreciase sus efectos en los contornos externos de la sombra de un objeto que forma un foco puntual, pero no de los internos, como hoy hacemos en cualquier laboratorio escolar (ver la mancha de Poisson en el ejemplo inmediato)



EL EXPERIMENTUM CRUCIS DE POISSON-ARAGO



fig 3.43

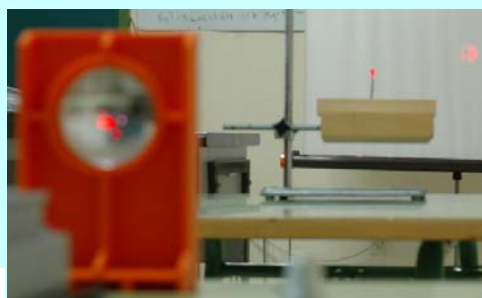


fig 3.44

Objetivos:

- Conocer las condiciones históricas en las que se crea una nueva teoría .
- Valorar la importancia de la experiencia en el asentamiento de un nuevo modelo.
- Interpretar resultados paradójicos con la ayuda de la teoría ondulatoria de la luz.

Materiales:

- Un laser de Helio-Neon, una lente convergente de distancia focal + 50 mm, una bola de rodamiento de 2 mm de diámetro pegada sobre un alambre metálico delgado, una pantalla blanca.

Montaje:

Se sitúa la bola de rodamiento en su soporte a 1,5 m de la lente y se observa la proyección de su sombra sobre una pantalla situada a 4 m de ella. El resultado que se observa es el indicado en la figura.

Cuestiones

- haz un diagrama a mano alzada de la observación en pantalla
- propón una explicación cualitativa a la mancha central brillante
- Investiga el conflicto inicial entre el modelo corpuscular de Poisson y la contradicción que observaba en el ondulatorio propuesto por Fresnel.
- ¿Quién es el autor del diseño de este experimento? ¿Cuál fue la reacción de Poisson?

Haz un informe de un máximo de dos folios documentándote en Internet u otras fuentes (Lecturas de Óptica) sobre las figuras de Fresnel, Poisson y Arago.

POLARIZACIÓN DE LA LUZ

Se dice que una onda mecánica está polarizada en un plano, o linealmente polarizada, cuando todas las moléculas del medio vibran en un mismo plano. Las ondas de agua son un claro ejemplo de *polarización lineal* o plano-polarizadas

La misma definición se extiende a una onda electromagnética con la salvedad de que ahora lo único que oscila son los vectores campo eléctrico \mathbf{E} , e inducción magnética \mathbf{B} . La luz visible emitida por focos convencionales, está compuesta de infinidad de pequeños trenes de onda de unos 3 cm de longitud, polarizados linealmente pero orientados al azar, lo que supone que un foco luminoso *no tiene* una onda neta polarizada en un único plano. Por este motivo, un observador que viera frontalmente un haz de este tipo vería una infinidad de rayas orientadas al azar.

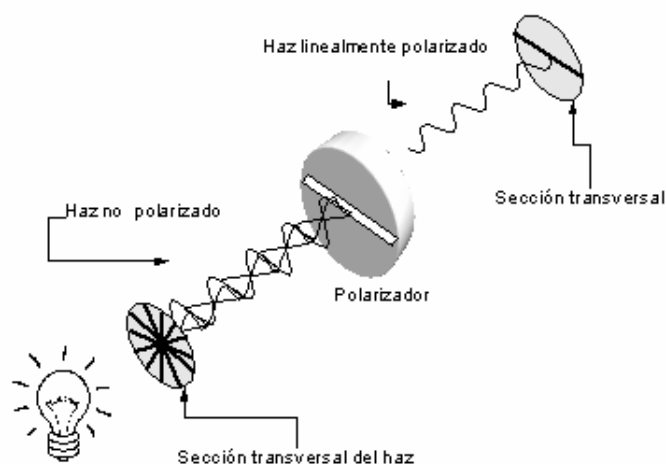
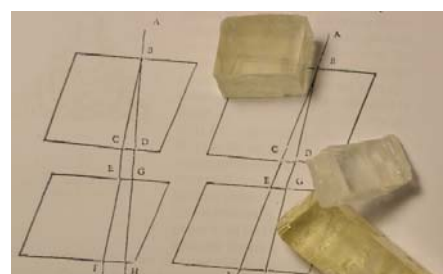


fig 3.45



fig# 3.46

Sin embargo, existen materiales que permiten seleccionar de entre todos los trenes, sólo aquéllos que oscilan en un plano determinados. Estos materiales, llamados *polarizadores* han demostrado suma utilidad en las tecnologías modernas.

También es posible conseguir con algunos materiales (birrefringencia) que el extremo del vector \mathbf{E} emergente, describa un círculo o una elipse. Se dice entonces que la luz está *circular o elípticamente polarizada*.⁷

Espato de Islandia

Este material que se encuentra en Eskifjordur, una isla de Islandia, es carbonato de calcio cristalizado en el sistema hexagonal. Igual que otros minerales presenta la propiedad de que los objetos se ven dobles a su través, lo que se conoce como el fenómeno de la *doble refracción*, ya conocido por el danés Bartolinus y el holandés Huygens.

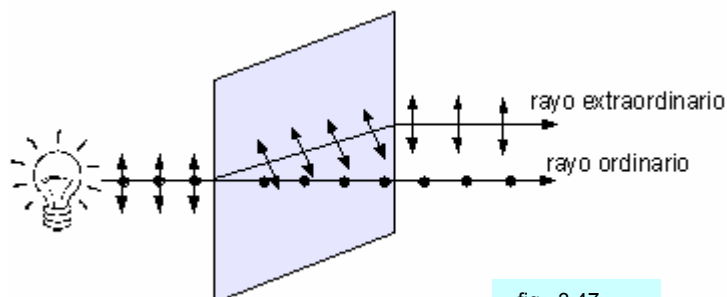


fig 3.47

Sus propiedades parecen inexplicables: además de la citada, si se lanza un estrecho rayo de luz *laser* a su través, se desdobra en otros dos, uno *ordinario* y otro *extraordinario*, llamados así porque si se gira el cristal alrededor de un punto, mientras que un rayo permanece inmóvil, el otro gira. Además si a la salida del primer cristal se coloca otro perpendicularmente, uno de los rayos desaparece lo que demuestra la polarización de ambos rayos. En la gráfica adjunta adoptamos el convenio de representar con flechas a lo largo de una

⁷ La senda de Aton

línea el vector campo que oscila en un plano vertical, y con puntos el que oscila en un plano horizontal, lo que ilustra cómo se polarizan el rayo ordinario y extraordinario.

Polarización con espejos no metálicos : ángulo de Brewster

El francés Malus comprobó que al mirar el reflejo procedente de las vidrieras del palacio de Luxenburgo a través de un trozo de Espato, la luz se podía oscurecer completamente si un vidrio se giraba hasta que la luz que incidía sobre él formaba un ángulo de unos 56° . lo que demostraba que el vidrio también pueden polarizar la luz.

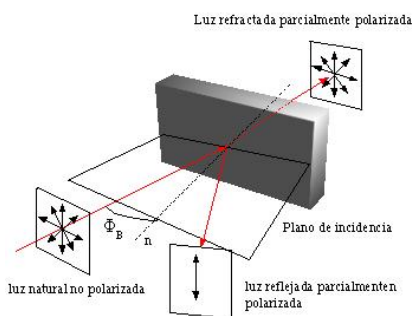


fig 3.48

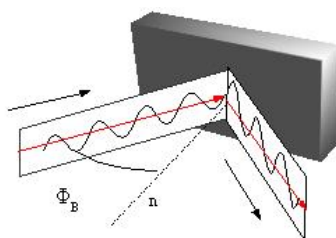


fig 3.49

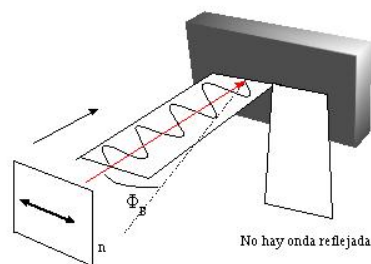


fig 3.50

Este ángulo que depende de cada material, se conoce como ángulo de Brewster. En estas condiciones, el rayo reflejado lo hace en un plano perpendicular al de incidencia. Si suponemos ahora que el rayo que llega está polarizado en el plano de incidencia, el rayo desaparece, y de igual modo, si lo estuviera en un plano perpendicular, el rayo emergente lo estaría también en un plano perpendicular.

Brewster hizo su famosa experiencia en la que un rayo incidía consecutivamente sobre dos espejos conseguidos con vidrio pintado de negro por su cara posterior (a fin de eliminar el reflejo de la segunda superficie) según el ángulo indicado, de modo que la segunda superficie se orientaba de modo que el plano de polarización del haz que salía del primer espejo incidencia. El hecho de que no apareciese ninguna luz, ¡fue realmente paradójico!.



fig 3.51

Si la experiencia se repite sobre un vidrio traslúcido por ambas caras o una superficie de agua, el rayo reflejado sale con una polarización considerable, mientras que el transmitido sólo en parte. Variando la incidencia, es posible encontrar una dirección en la que toda la luz reflejada está polarizada en el plano perpendicular al de incidencia.

Brewster , el inventor del caleidoscopio y el estereoscopio comprobó que cuando el rayo incidente verificaba la citada condición, el rayo reflejado y el refractado formaban un ángulo de 90° .

De ahí se deduce que como r y r' son ángulos complementarios,

$$\sin r = \cos r',$$

y como ,según Snell,

$$n_1 \sin r = n_2 \sin r' = n_2 \cos r$$

Si el primer medio es aire $n = 1$ y queda: este ángulo :

$$n_2 = \tan r$$

luego conocido el índice de refracción es posible conocer el ángulo de incidencia $\phi = r$ el ángulo bajo el cual toda la luz sale polarizada en un plano. Cuando el segundo medio es vidrio, el ángulo es de 56° .

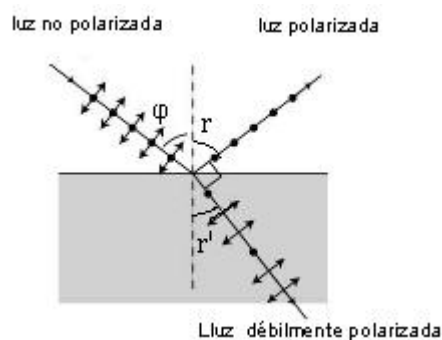


fig 3.52

Ésta ley así enunciada no es más que una lectura de un fenómeno, pero no explica el porqué. Una explicación en profundidad se hace considerando que las cargas microscópicas que oscilan, reemiten la radiación que reciben y se comportan igual que las antenas⁸, y al igual que en estas, no emerge radiación en la dirección dipolo.

Polaroides

En 1928, el joven estudiante de 19 años , E.H. Land, inventó un polarizador depositando cristales de la sustancia herapatita alineados sobre una lámina.⁹ La alineación de estas moléculas conseguía un efecto similar al de alambres paralelos sobre los que incide una microonda al hacer vibrar los electrones del alambre según esta dirección, ya que filtran solo la componente del campo eléctrico perpendicular a la red , lo que permite que la componente perpendicular, polarizada en ese plano, continúe sin ser modificada. Aunque hoy día se fabrican con otros materiales, el funcionamiento es el mismo.

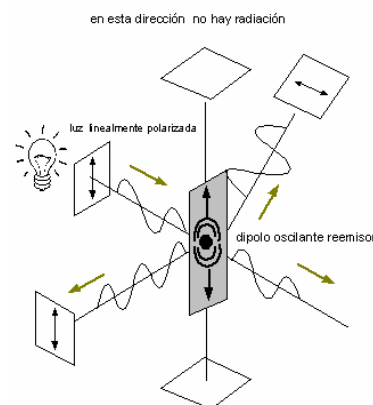


fig 3.53

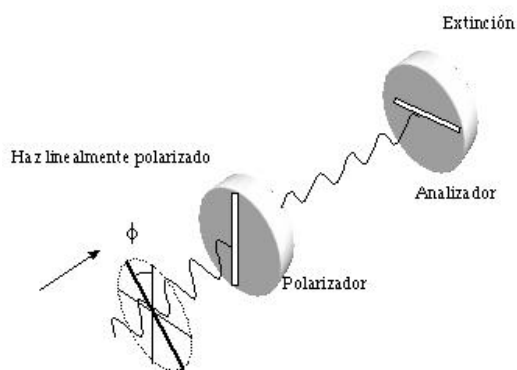


fig 3.54

Cuando dos polarizadores se colocan sucesivamente , por convenio al primero se le llama polarizador y al segundo analizador. Al girar el segundo , es posible filtrar la luz que llega hasta un detector desde un máximo de intensidad hasta extinción total.

La utilización de estos materiales no sólo es para fines científicos:

⁸ FS. Lecturas

⁹ Hecht.Optica. Adisson Wesley

- Varias marcas de gafas de sol los utilizan como protección o para uso de los pescadores deportivos que pueden con ellas eliminar los reflejos (polarizados) del agua y ver claramente el fondo de los ríos,
- Las pantallas de plasma de las calculadoras, tienen también estos cristales para aprovechar el hecho de que la luz polarizada que incide sobre el plasma puede atravesarlo o no dependiendo del estado de polarización que un campo eléctrico interno provoque sobre pequeñas regiones de este plasma y conseguir la visualización de números o letras.
- Los gabinetes de optometría incorporan ya optotipos polarizados para analizar la visión binocular,
- Los departamentos de análisis de materiales simulan tensiones de piezas de acero con prototipos de acetato que al iluminarse con luz polarizada se ven policromados, etc.

Contexto histórico|



Un nuevo cambio en el modelo de la luz

El estudio científico de este fenómeno lo iniciaron ya Newton y Huygens al tener conocimiento de la extraña piedra descubierta por en Islandia por Bartolinus, a través de la cual las imágenes se veían dobladas. O si se atraviesa con un haz de luz se dividía en dos rayos

, Para Newton los corpúsculos de luz, además de los “fits” tendrían “ polos “ (de ahí *polarización*) asimétricos responsables de su comportamiento mientras Huygens lo asocia acertadamente a las propiedades del medio que atraviesa el rayo.¹ Y lo divide en un ordinario y otro extraordinario que refractan ángulos distintos y viajan a distintas velocidades dentro del cristal., aunque acaba confesando su ignorancia sobre la naturaleza de este fenómeno.

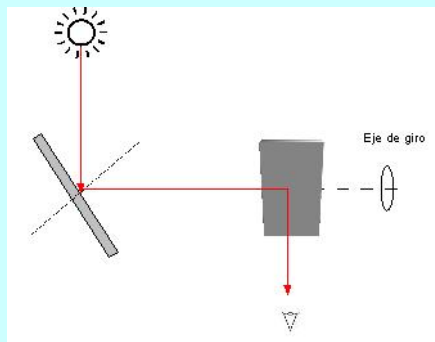
Cien años después, el soldado Etienne Louis Malus, a su vuelta de Egipto ,descubre que los vidrios normales también producen polarización de la luz., y , como Newton ,busca infructuosamente polos de los corpúsculos que lo expliquen .

Fue un difícil camino el que recorrieron Fresnel y Young para intuir esta propiedad que obligaba a replantear el modelo de ondas longitudinales por el de otras transversales porque el *éter* capaz de transmitir las debía ser un sólido muy ligero y muy elástico , cosa que parecía absurda a pesar de lo abrumador de los testimonios a su favor. De hecho Fresnel pensaba en la existencia de dos éteres que soportaban los impulsos longitudinales y transversales. Con este modelo aún hoy podemos explicar todos los comportamientos ondulatorios de interferencia, difracción y polarización de la luz. Lo que constituía una *investigación básica* para los científicos o un pasatiempo divertido para muchos contemporáneos fue la base de las actuales tecnologías ópticas de recubrimientos de superficies, del análisis de isómeros químicos, de la observación de muestras minerales en el microscopio petrográfico, del Laser, de las holografías, de las pantallas de plasma de las calculadoras y monitores de TV , etc.

En 1873, el escocés James Clerk Maxwell propuso un éter único como soporte de la propagación de sus ondas electromagnéticas de las que la luz, y el calor son sólo una parte. El hecho de que la velocidad de la luz calculada por el danés Römer en 30000000 Km/s coincidiera con la de las ondas electromagnéticas que predecía Maxwell, supuso el espaldarazo definitivo (para su tiempo) de la naturaleza de la luz como onda.



LA POLARIZACIÓN DE MALUS CON ESPEJOS NO METÁLICOS



Objetivos :

fig 3.55

- Constatar la relación entre el ángulo de incidencia de un haz luminoso y la disminución de intensidad del haz reflejado.
- Relacionar el fenómeno obtenido con el espejo, con el que aparece en el espato de Islandia y las láminas del plástico *polaroide*.
- Discutir las ventajas de un modelo transversal de la luz frente a uno longitudinal, tras alguna lectura de textos históricos de Malus.
- Medir el ángulo de Brewster en la interfase aire-vidrio

Materiales: Vela de parafina, bases soporte, nueces, varillas roscadas, bases de madera pintadas en negro con orificios según un eje longitudinal y otro transversal, dos vidrios con la cara posterior pintada en negro satinado.

Montaje y observaciones: Se intercala una lámina polaroide entre el haz reflejado en el primer espejo y la vista. Según se giran el polaroide y el espejo hasta observar extinción total, obtenemos una incidencia crítica de 56° llamada ángulo de Brewster. A continuación se coloca el segundo espejo de modo que pueda girar alrededor de un eje perpendicular al anterior. Girando sobre este eje, para cierta posición se observa extinción casi total (debido a su mecanizado, los cristales comerciales no son totalmente isótropos).

Cuestiones:

- ¿Por qué Newton llamó polarización a este fenómeno relacionándolo con el magnetismo?
- Al girar el polaroide transversalmente a la dirección del haz reflejado, aparece distinta luminosidad del haz. ¿Es esto compatible con que el haz tenga iguales propiedades en cada dirección?
- ¿Qué efecto tiene interponer un polaroide de eje vertical en el camino de una luz polarizada en un ángulo arbitrario?

¿Sabías que?

Si un tubo transparente se llena con una disolución de ciertas sustancias orgánicas y se intercala longitudinalmente entre dos polarizadores, se observa un giro en el plano de polarización de la luz. A mediados del siglo XIX Biot inició la aplicación de esta técnica a la determinación de la concentración de azúcares (sacarosa y glucosa) en disoluciones. El sacarímetro fue un instrumento muy útil dado el interés comercial del azúcar, y también médico, para medida de glucosa en sangre en diabéticos. Con fines más científicos se sigue utilizando para la determinación de la velocidad de reacciones o para comprobar su estado de equilibrio químico.



fig 3.56

LA SÍNTESIS ELECTROMAGNÉTICA

En 1864, Maxwell presentó en la Royal Society su Teoría Electromagnética, lo que valió ingresar entre los cinco grandes de la Física. En ella recopila de nuevo la ley de Gauss para cargas eléctricas en reposo, la ley de Gauss del magnetismo, la ley de Lenz-Faraday y el teorema de Ampère ampliado a las corrientes de desplazamiento, que ya expresaban relaciones entre campos eléctricos y magnéticos, y hace varias afirmaciones revolucionarias:

- Campos eléctricos variables en el tiempo, generan ondas transversales a su sentido de propagación, que pueden viajar libremente en el espacio sin necesidad de ningún éter llevando energía. A su vez, campos magnéticos variables generan campos eléctricos variables, lo que produce una sucesión periódica de ambas perturbaciones. paso, imanes y cargas minúsculos se moverían de modo oscilatorio.
- Estas ondas, que no necesitan de soporte material para viajar están formadas por campos eléctricos y magnéticos variables en el tiempo y en el espacio, que viajan a la velocidad que Römmmer, Fizeau y Foucault habían calculado para la luz.
- La luz visible no es más que una mínima parte del espectro de estas ondas.
- La existencia de la luz polarizada sólo se podía explicar por la transversalidad de estas ondas.

Las cuatro ecuaciones de la teoría permitieron incluir dentro de una nueva parcela de la Física no sólo los fenómenos de electrostática e inducción magnética sino también la teoría ondulatoria la luz con la que Fresnel había postulado la existencia de unas ondas de luz, también transversales a su avance, y que tan fructífera se había mostrado. Los campos eléctricos alternos producidos generaban según Ampère campos magnéticos perpendiculares que, a su vez producían corrientes como había comprobado ya Faraday transportando la energía por el espacio sin necesidad de ningún éter transmisor. Aunque las ondas de Fresnel necesitaban de un éter sólido y elástico, la matemática que empleada, daba los mismos resultados que la de Maxwell en el espectro de la Óptica visible. Ello permite su aplicación al estudio de la luz, a sabiendas de que estaremos usando un modelo más simple (la física trabaja de este modo con frecuencia).

La expresión en forma integral de las cuatro ecuaciones que explican todo el Electromagnetismo, de las cuales, las tres primeras son ya conocidas por el alumno, toman la siguiente forma:

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\oiint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{d\oiint \vec{B} \cdot d\vec{S}}{dt}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(I + I_D) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oiint \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

La única nueva es la cuarta en la que *Maxwell*, fue capaz de predecir la existencia de unas corrientes de desplazamiento entre las placas de un condensador durante el proceso de su carga y descarga a partir de fuerzas electromotrices alternas y con ello la existencia de unas ondas viajeras que se propagaban en el espacio.

Recordemos que la ley de Ampère establece que si calcula la circulación del vector inducción magnética a través de una línea cerrada C que encierra uno o varios cables atravesados por corriente, se verifica que:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I$$

Sin embargo, si consideramos un circuito que alimenta un condensador con una corriente alterna e intentamos aplicar esta ecuación a una curva cerrada situada en la región entre placas y concéntrica con el eje del cable, parece que esta ecuación dejaría de ser válida. No obstante, se detectaba la presencia de un campo B de difícil justificación si no existían corrientes de Ampère en su eje.

Un análisis más profundo aplicado al caso de que la separación de la región fuera de escasos diámetros atómicos dificultaba aún más el problema, pues si a ambos lados de la interrupción había campo \vec{B} , no parecía lógica su extinción, en la zona fronteriza. Para soslayar esta dificultad, Maxwell postuló la existencia de unas corrientes de desplazamiento en el espacio entre placas, que serían responsables de esta acción magnética y cuyo sentido cambiaba constantemente según lo hacía la polaridad de la fuerza electromotriz inducida predicha por la ley de Faraday-Lenz.

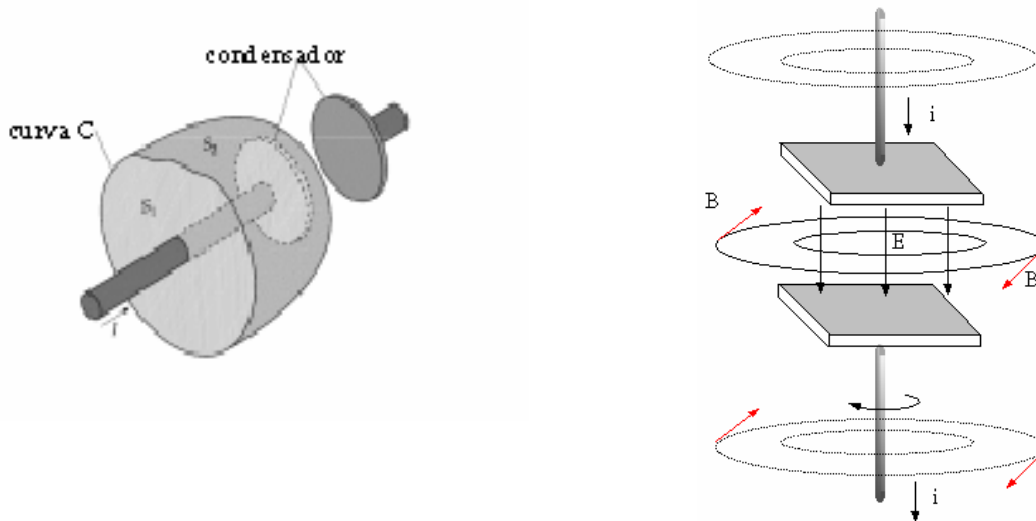


fig.. 3.57 Corrientes de desplazamiento en el espacio entre placas de un condensador

Ampliando el concepto de región a la que es aplicable el teorema de Gauss, eligió una superficie cerrada que pasaba por un lado por la región discontinua y por otro se cerraba en una curva C concéntrica con el cable por otro. El teorema de Gauss aplicado a ella, quedaba de la forma:

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

Y derivando a ambos lados de la ecuación se obtenían unas *corrientes de desplazamiento* I_D capaces de explicar la aparente contradicción:

$$\frac{d}{dt} \oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{d}{dt} \left(\frac{Q}{\epsilon_0} \right) = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\epsilon_0} I_D \Rightarrow I_D = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oiint \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Con ellas, era posible generalizar el teorema de Ampère a su expresión actual:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu(I + I_D) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oiint \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Las ecuaciones de Maxwell en el espacio vacío:

La fluctuación de dichas corrientes y del campo B, produciría de otra parte la emisión de unas teóricas ondas emitidas radialmente desde el eje del condensador hacia el espacio exterior, transversalmente a su dirección de propagación. Cuando procedió a calcular su velocidad teóricamente, y a sustituir los valores de las constantes permisividad dieléctrica y permeabilidad magnética en el vacío, llegó a que debía cumplirse que :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Que sorprendentemente coincidía con la velocidad de la luz $v = c$ en el aire calculada por Fizeau y Foucault. Ello obligó a incluir las ondas de luz en el mismo grupo de estas nuevas ondas. En la nueva reestructuración de la Física, las ondas de luz no eran más que un tipo más de las radiaciones emitidas por cargas eléctricas aceleradas, los electrones atómicos en este caso

Expresando las ecuaciones anteriores en función de c :

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\phi_B}{dt} \qquad \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{c^2} \frac{d\phi_E}{dt}$$

El significado de ambas es profundo: cambios en los flujos magnéticos que atraviesan cualquier superficie, inducen campos eléctricos cambiantes que a su vez crean flujos eléctricos que crean campos magnéticos. El ciclo se repite de modo indefinido en todas las regiones del espacio dando lugar a las conocidas ondas electromagnéticas.

En su viaje por los medios vacíos, dos vectores mutuamente perpendiculares un vector eléctrico \mathbf{E} y otro magnético \mathbf{B} , transportaban energía y podían interaccionar con los electrones de la materia haciéndose perceptibles.

Las ecuaciones de estos campos variables en el espacio y el tiempo eran muy similares a las ya conocidas ondas mecánicas transversales en un medio elástico.

$$E = E_0 \sin(\omega t - kx)$$

$$B = B_0 \sin(\omega t - kx)$$

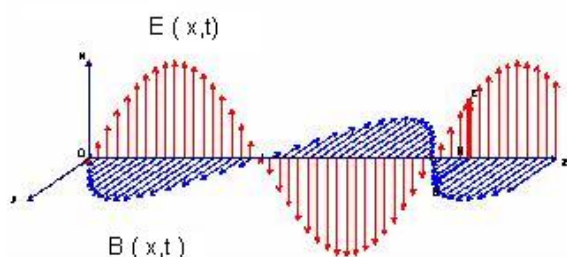


fig 3.58

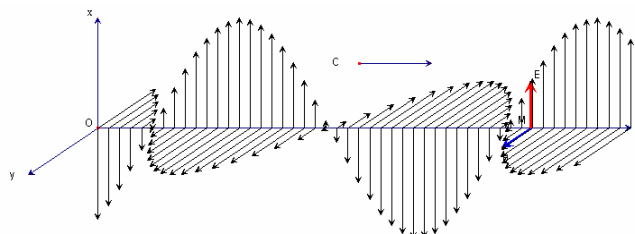


fig 3.59

La importancia de los físicos experimentales

Una decena de años después de la presentación de su teoría, el joven alemán Heinrich Hertz, una vez profesor de la Universidad alemana de Karlsruhe, eligió como tema de investigación la creación experimental de estas ondas¹⁰. Tras la instalación en 1888 de un circuito oscilante de muy alta frecuencia conectado a los extremos de una antena, detectó con un anillo resonador la presencia de estas ondas viajeras de período igual al de la oscilación del circuito, hasta treinta de metros.



HEINRICH RUDOLF HERTZ
1847 - 1894

¹⁰ La senda de Aton, p. 379

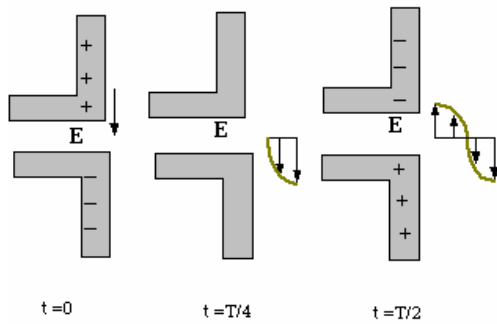


fig.. 3.60 Generación de oem en una antena

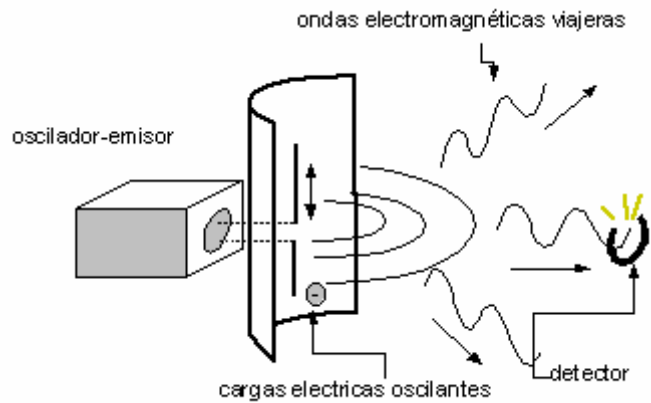


fig.. 3.61 Reflección y detección de oem por Hertz

Aunque Hertz nunca sospechó la posibilidad de aplicar sus ondas a las comunicaciones, el italiano Marconi mejoró su diseño hasta conseguir alcances a distancias cada vez mayores (desde el canal de la Mancha hasta el Atlántico).

Las nuevas ondas, creadas unas y naturales otras, han marcado nuestra cultura hasta el extremo de que sería impensable un futuro sin ellas. Portadoras de energía y momento lineal a unas determinadas frecuencias y longitudes de onda, interaccionan con la materia con distintos efectos. Sus aplicaciones no siempre inocuas en astronomía, iluminación, medidas, industria, medicina, cocina, comunicaciones, etc., son sobradamente conocidas. El conjunto de todas ellas clasificadas por su longitud de onda, se denomina *espectro electromagnético*.

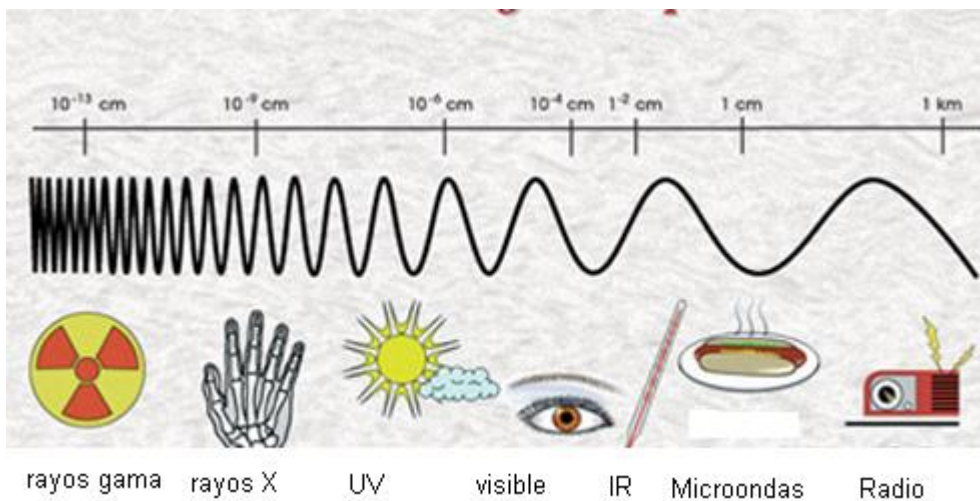


fig 3.62 El espectro electromagnético

A.1



EL EXPERIMENTUM CRUCIS DE HERTZ (adaptado)

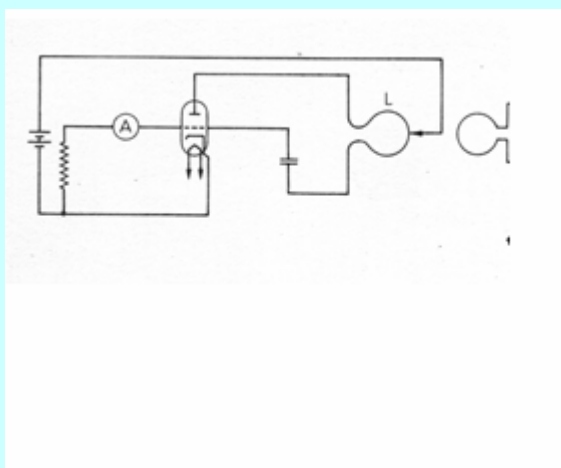


fig 3.63

Objetivos:

- Conseguir y detectar ondas viajeras electromagnéticas de muy alta frecuencia.

Fundamentos:

Maxwell demostró teóricamente que si en circuito oscilante la vibración es suficientemente alta, una parte considerable de la energía se emite al espacio en forma de ondas electromagnéticas que viajarían a la velocidad de la luz. Hertz lo demuestra experimentalmente con un diseño original. En nuestro circuito se consigue una frecuencia $f = 1 / (LC)^{1/2}$ que resulta ser del orden de 10^8 ciclos/ s (Hertzios)

Materiales:

- Fuente de alimentación 250 V DC, condensador de 10 pF , dos espiras de una sola vuelta, válvula EC 92, resistencia 8,2 kΩ, lamparita detectora de 6 V, amperímetro y voltímetro, una pinza de cocodrilo. (Equipo de Electricidad II de ENOSA)

Montaje:

La válvula triodo EC 92 se encarga de mantener las oscilaciones que de otro modo se amortiguarían rápidamente en el circuito LC indicado. A fin de identificar el lugar de la espira de emisión nula de oem (diferencia de potencial cero) se coloca una lamparita de neon de modo que un extremo toca la espira, y el otro, sujeto por los dedos, se lleva a tierra. En esa posición es donde se coloca a continuación la pinza que mantiene las oscilaciones. Se comprueba la emisión de ondas electromagnéticas porque al colocar un circuito detector formado por una espira y una lámpara de 6 V en las proximidades , ésta se ilumina con intensidad variable, según la distancia.

CUESTIONES

- La experiencia inicial, la realizó Hertz con un carrito de Rhumford como oscilador y un anillo de latón abierto con dos borlas en sus extremos como detector, en los que saltaba una chispa. Consigue el circuito histórico (Internet, Historias de Óptica,...) y compáralo con el te proponemos.
- ¿En qué se basó Maxwell para predecir la existencia de las ondas electromagnéticas? ¿ Hizo montajes experimentales?

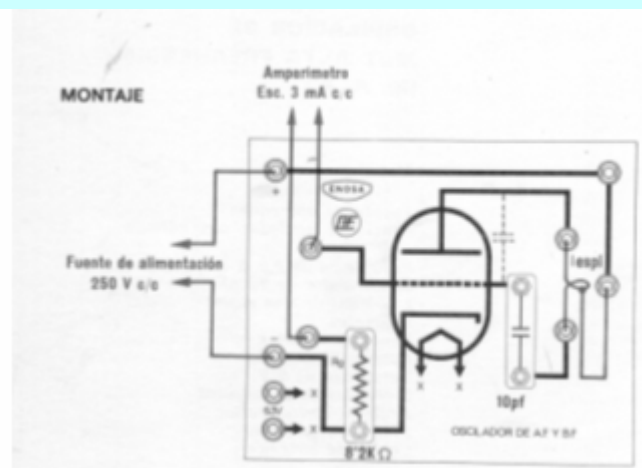


fig 3.64

A.2

ACTIVIDAD AVANZADA: El Principio de Fermat ¹¹

El principio del tiempo mínimo, que Fermat rescata del griego Heron, da una descripción de cómo suceden las cosas, pudiendo inducirse de ello erróneamente que el rayo sabe de antemano cuál es su trayectoria.

Un modelo ondulatorio propuesto por Richard Feynmann, da un significado mucho más físico a este principio: son las interferencias constructivas o destructivas de las ondas secundarias de Huygens, las que determinan el camino de los rayos reflejado y refractado. El mismo autor hace después un tratamiento cuántico en el que el fotón sigue la trayectoria de máxima probabilidad, lo que descarta el determinismo inicial del principio.

Objetivos :

Construir y comparar distintas trayectorias de varios rayos y seleccionar la correcta.

Materiales :

Papel milimetrado, tijeras, pizarra magnética, imanes comerciales. Frentes de onda recortados en papel o listones estrechos de panel de madera con frentes de onda dibujados en él .

Reflexión de la luz

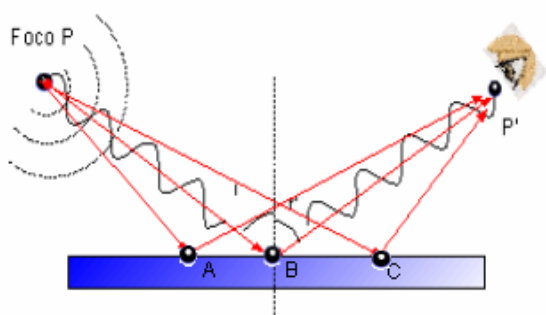
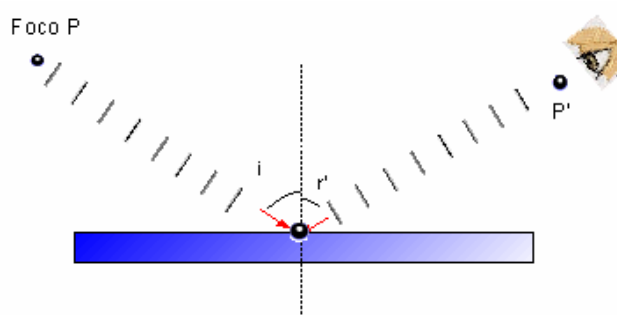


fig 3.65



fig# 3.66

Los frentes de onda emitidos en todas direcciones desde P, al llegar al espejo cada punto de la superficie reemite como foco secundario. La interferencia de ellos sólo será máxima en un entorno muy estrecho del punto del espejo que devuelve el rayo con un ángulo de reflexión igual al de incidencia.

Si llamamos PA PB PC,... a los caminos ópticos, los tiempos invertidos deben verificar que

$$t_{PA+AP'} < t_{PB+BP'} < t_{PC+CP'}$$

y como ambas ondas (la incidente y la reflejada) viajan en el mismo medio, los tiempos son proporcionales a las longitudes de onda.

La búsqueda del punto B, la haremos pues por tanteo, con nuestra tira de papel, contando número de longitudes de onda en el recorrido de P a cada punto del espejo sumado al retorno hasta P'. En el punto B, este número es el menor de todos, y en sus inmediaciones se aproxima mucho a este valor, y por ello la suma en las inmediaciones dará una interferencia constructiva. Fuera de esta zona, las sumas interfieren enseguida destructivamente.

¹¹ Adaptación extraída del texto de Benjamín Cromwell, *Optics*.
474

Podemos hacer la experiencia para el gran grupo en una pizarra magnética tipo Vileza sobre la que se adhieren los listones graduados en longitudes de onda sobre una base imanada.

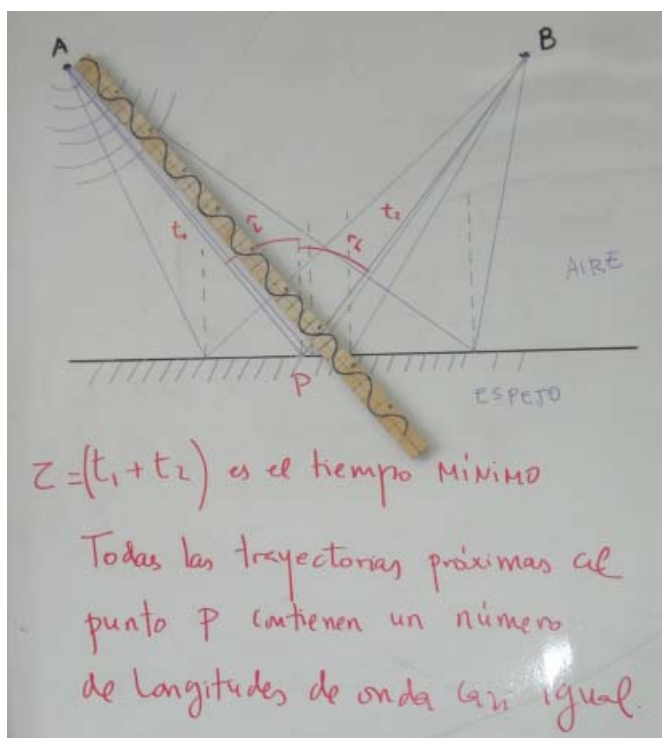


fig 3.67

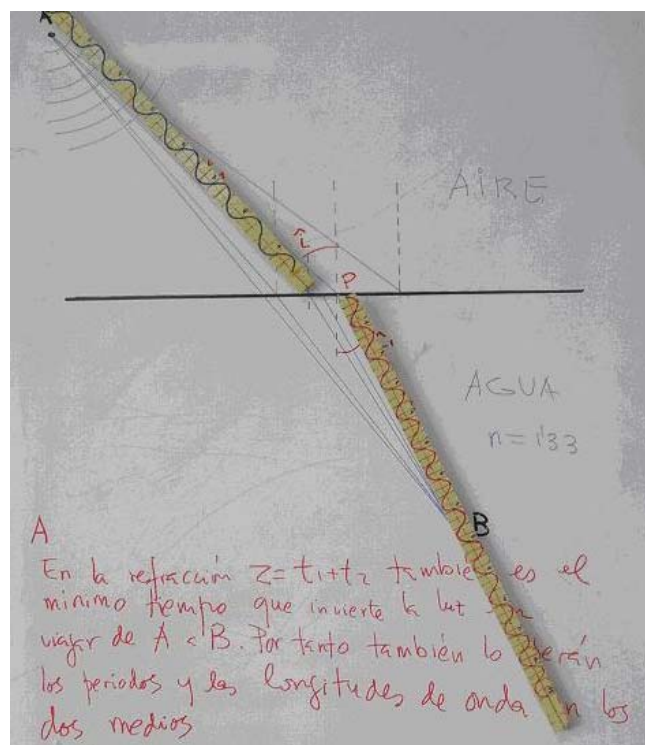


fig 3.68

Refracción de la luz:

Como al cambiar de medio la longitud de onda disminuye y el periodo se mantiene, las tiras de papel se construyen corregidas para cada medio aplicando el índice de refracción

$$\lambda_2 = \lambda_1 / n$$

Como se mantiene la proporcionalidad entre tiempos y longitudes de onda, el punto problema A será aquél en que la suma de longitudes de onda:

$$PA + AP'$$

en cada trayecto sea mínimo.

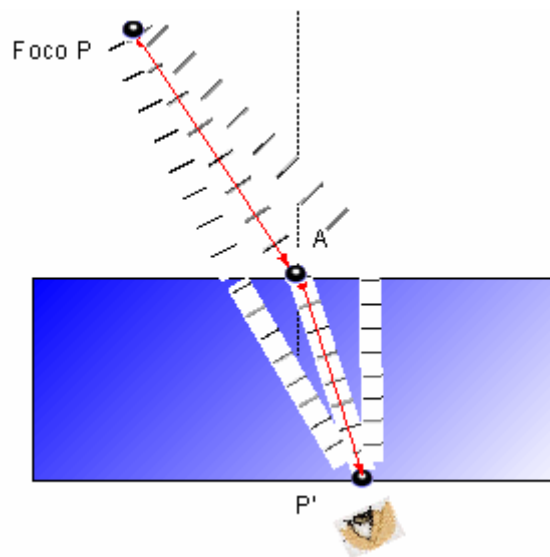


fig 3.69



Christian Huygens es una de las personas más importantes de la historia de la física. Fue llamado desde Holanda a París para dar prestigio a la recién creada academia de Ciencias de París, celosa de los logros de la Royal Society de Londres. En Londres, Newton publica su *Tratado de Óptica* en 1704. En Holanda Huygens publica su *Tratado de la Luz* en 1690. En su prefacio, toma como testigos a sus colegas de la academia:

Escribí este tratado durante mi estancia en Francia hace doce años; y se lo comuniqué en 1678 a las personas sabias, que componían entonces la Academia Real de las Ciencias, a la que el Rey me había honrado en llamar. Varios de sus miembros, que aún viven, podrán acordarse de su presencia cuando hice la lectura...

Tanto para él como para Newton, cuenta mucho la cuestión de la prioridad, en ese contexto de rivalidad. Ahora lo que nos interesa es la divergencia de opinión de estos dos sabios respecto de la naturaleza de la luz. Aunque Newton concibe la luz como formada por pequeñas partículas, Huygens se opone a ello desde su primer capítulo:

Cuando se considera la extrema velocidad a la que la luz se extiende por todas partes, y que cuando viene de distintos lugares, incluso en sentidos opuestos, ambos rayos atraviesan de un lado a otro sin estorbarse, se comprende bien que cuando vemos un objeto luminoso, no puede tratarse de transporte de una materia que, desde ese objeto viene hacia nosotros, lo mismo que una bala o una flecha que atraviesan el aire. Es pues de otro modo como se extiende. Lo que puede llevar a comprenderlo, es el conocimiento que tenemos de la propagación del sonido en el aire.

Sugerencias para el uso de ese documento como recurso

Se puede hacer argumentar a los alumnos las dos contradicciones que Huygens encuentra a la teoría de los corpúsculos de Newton en los dos hechos experimentales reseñados.

- ❑ Se podría empezar por explicar cierto número de expresiones de Huygens como “extrema velocidad”, “se extiende, sin estorbarse”. Aunque los textos antiguos no son fáciles de leer, hay que resistirse a la tentación de reescribirlos: además del respeto al autor, está el riesgo de deformación de su pensamiento.
- ❑ Se preguntará después a los alumnos por qué Huygens hace alusión a la propagación del sonido en el aire en su texto, anticipando la relación de analogía que Huygens expondrá de inmediato en el texto.
- ❑ Se terminará constatando que el razonamiento de Huygens es de naturaleza analógica. Se les invitará a , siguiendo la misma vía, considerar otra propiedad de la luz : la difracción. ¿Puede ésta producirse con las ondas de agua?

Ejemplos de cuestiones a proponer :

1. Subrayar en el texto las palabras que no estáis seguros de conocer. Intercambiad vuestras explicaciones y proponer a la clase una reformulación más clara.
2. ¿Sobre qué hechos nacidos de la observación se apoya el autor ? ¿Qué afirmación terórica se deduce en lo que respecta a la naturaleza de la luz ?
3. En vuestra opinión, ¿hay contradicciones entre ambas explicaciones?. Discutirlo.
4. El argumento de la relación entre un cierto número de semejanzas, constituye una analogía. Una analogía ¿puede ser una prueba?. ¿Qué puede reforzar la importancia de una analogía? .

¹² Anexos a los programas de física y química franceses. Terminal S. EduScol. Marzo 2002

Problemas para casa



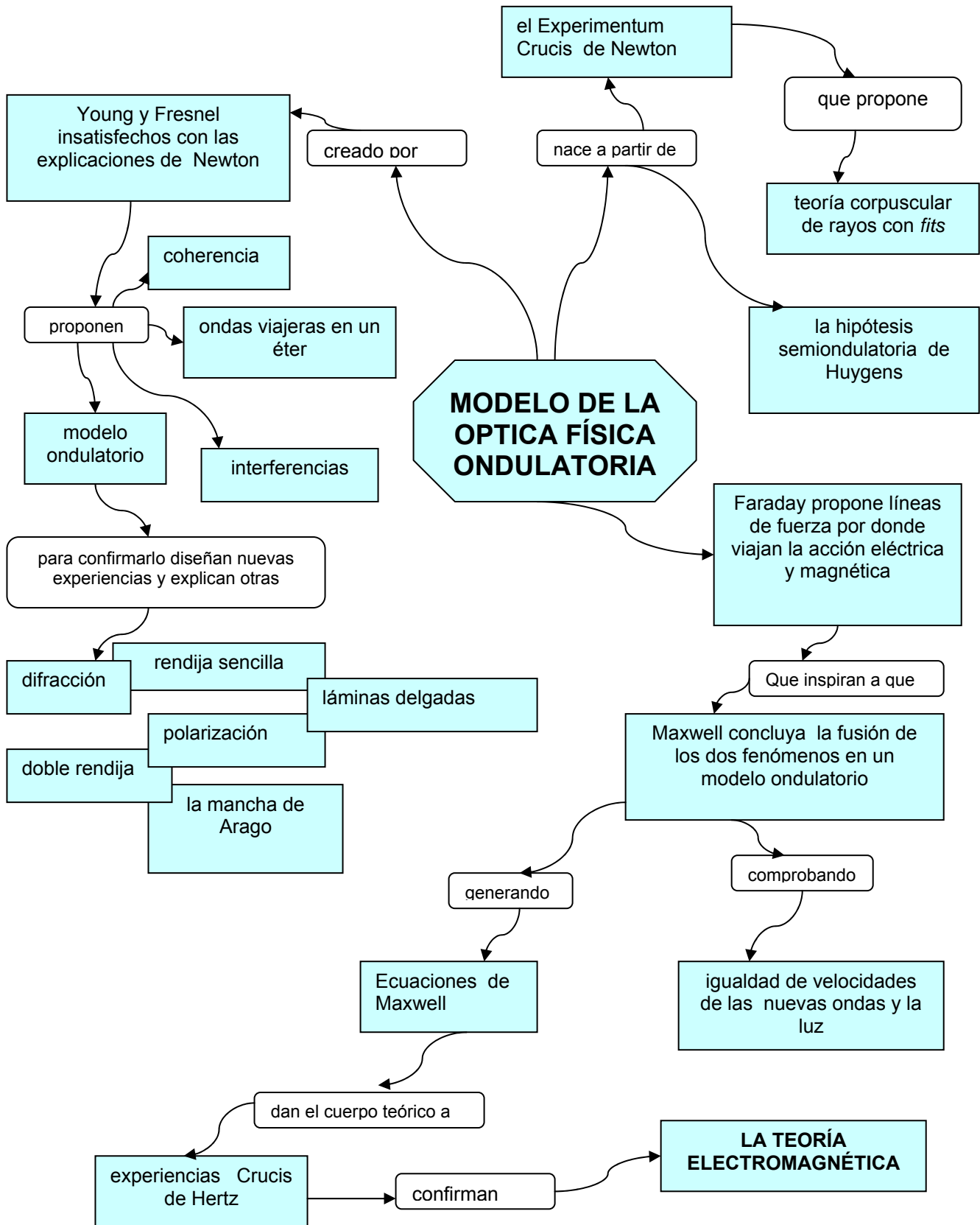
CUESTIONES

- 1) Explica por qué, cuando se observa desde el aire un remo sumergido parcialmente en el agua, parece estar doblado. Ayúdate de construcciones geométricas en la explicación. (Madrid LOGSE 1996)
- 2) Enuncia el principio de Huygens y utiliza dicho principio para construir el frente de onda refractado en el fenómeno de refracción de ondas planas. Deduce asimismo, la ley fundamental de la refracción en este caso.
- 3) Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque con un ángulo de 30° . ¿Qué ángulo forman entre sí los rayos reflejado y refractado? Si el rayo luminoso se propagase desde el agua hasta el aire ¿a partir de qué valor del ángulo de incidencia se presentaría el fenómeno de reflexión total? Dato: índice de refracción del agua = $4/3$.
- 4) Las ondas luminosas se propagan en el vacío con una velocidad de 3×10^8 m/s. Halle la longitud de onda que corresponde a una frecuencia de 6×10^{10} Hertzios. (Madrid, junio, 1996)
- 5) Indique las diferencias que a su juicio existen entre los fenómenos de refracción y dispersión de la luz.
 - a) ¿Puede un rayo de luz monocromática sufrir ambos fenómenos
 - b) ¿Por qué no se observa dispersión cuando un rayo de luz blanca atraviesa una lámina de vidrio de caras plano-paralelas?
- 6) Enuncie el principio de Huygens y aplíquelo a la construcción del frente de onda refractado en el fenómeno de refracción de ondas planas. Deduce asimismo la ley de la refracción en este caso.
- 7) Una superficie de discontinuidad plana separa dos medios de índices de refracción n_1 y n_2 . Si un rayo incide desde el medio del primer índice, razone si las siguientes afirmaciones son ciertas o falsas:
 - a) si $n_1 > n_2$ el ángulo de refracción es menor que el de incidencia.
 - b) Si $n_1 < n_2$ a partir de un cierto ángulo de incidencia se produce el fenómeno de reflexión total (Madrid septe 2002)
- 9) Un rayo de luz blanca incide desde el aire sobre una lámina de vidrio con un ángulo de incidencia de 30° .
 - a) ¿qué ángulo formarán entre sí en el interior del vidrio los rayos rojo y azul componentes de la luz blanca si los valores de los índices de refracción del vidrio para estos colores son respectivamente $n_1 = 1,612$ y $n_2 = 1,671$.
 - b) ¿cuáles son los valores de la frecuencia y de la longitud de onda correspondientes a cada una de estas radiaciones en el vidrio si las longitudes de onda en el vacío son respectivamente $\lambda = 656,3$ nm y $\lambda = 486,1$ nm? Datos: velocidad de la luz en el vacío.
- 10) Una lámina de vidrio de caras plano-paralelas, situada en el aire, tiene un espesor de 8 cm y un índice de refracción $n = 1,6$. Calcular para un rayo de luz monocromática que incide en la cara superior con un ángulo de 45° :
 - a) Los valores del ángulo de refracción en el interior de la lámina y del ángulo de emergencia correspondientes.
 - b) El desplazamiento lateral experimentado por el citado rayo al atravesar la lámina.
 - c) Dibujar la marcha geométrica del rayo.
- 11) Un rayo luminoso que se propaga en el aire incide sobre el agua de un estanque con un ángulo de 30° . ¿Qué ángulo forman entre sí los rayos reflejado y refractado?
- 12) Si el rayo luminoso se propagase desde el agua hasta el aire ¿a partir de qué valor del ángulo de incidencia se presentaría el fenómeno de reflexión total? Dato: índice de refracción del agua = $4/3$
- 13) Una fuente luminosa emite luz monocromática de longitud de onda en el vacío, $\lambda_0 = 6 \cdot 10^{-7}$ m (luz roja) que se propaga en el agua de índice de refracción $n = 1,34$. Determine:
 - a) la velocidad de propagación de la luz en el agua
 - b) la frecuencia y la longitud de onda de la luz en el agua. Datos: velocidad de la luz en el vacío.
- 14) Un láser de longitud de onda 630 nm tiene una potencia de 10 mW y un diámetro de haz de 1 mm. Calcule:
 - a) la intensidad del haz
 - b) el número de fotones por segundo que viajan con el haz
Datos: $c = 300.000$ km/s, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J s
Sobre la cara lateral de un prisma de vidrio de índice de refracción 1,4 y ángulo en el vértice 50° , incide un rayo de luz con un ángulo de 20° . Determine:
 - a) ángulo de desviación sufrido por el rayo el ángulo de desviación mínima que corresponde a este prisma. Datos: el prisma se encuentra situado en el aire.
- 15) El ángulo de desviación mínima de un prisma óptico es 30° . Si el ángulo del prisma es de 50° y éste está situado en el aire, calcula:
 - a) el ángulo de incidencia para que se produzca la desviación mínima del rayo. El índice de refracción del prisma (Madrid, septe 1998).

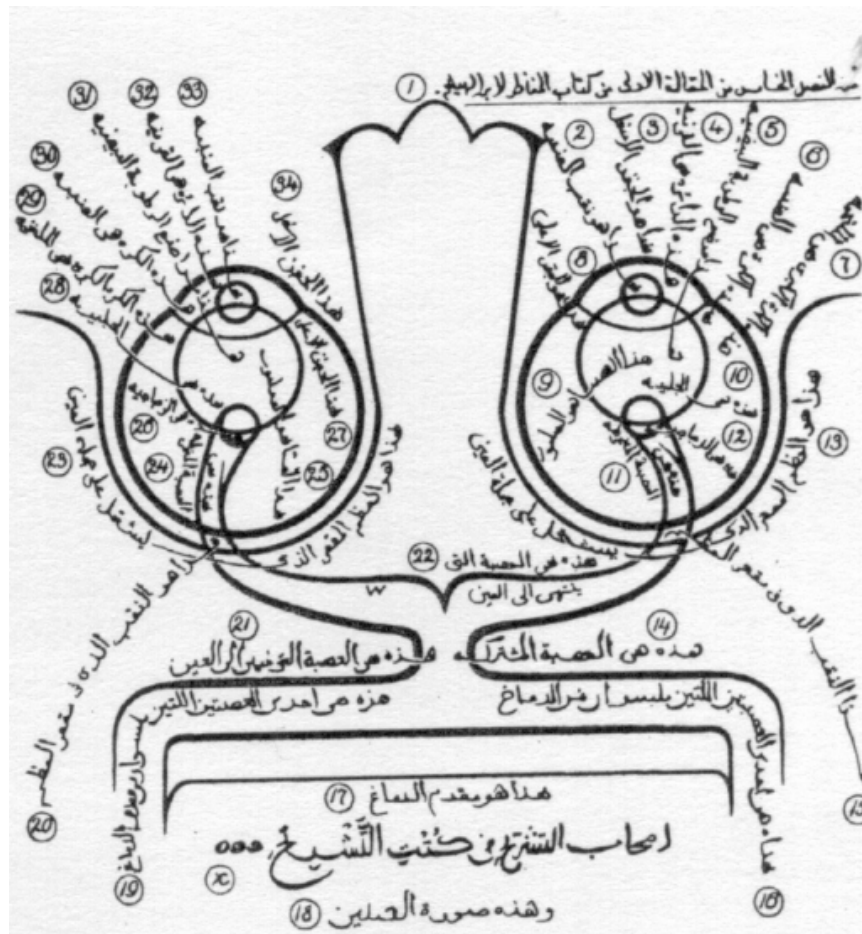
PROBLEMAS

- 8) Un rayo de luz amarilla de una lámpara de sodio, tiene una longitud de onda en el vacío de 589 nm. Determinar:
 - a) su frecuencia.
 - b) su velocidad de propagación, y su longitud de onda en el interior de una fibra de cuarzo, cuyo índice de refracción es $n = 1,458$.
 - c) El ángulo de incidencia mínimo para el rayo de luz que, propagándose por el interior de la fibra de cuarzo, encuentra la superficie de discontinuidad entre el cuarzo y el aire, y experimenta reflexión total DATO: velocidad de la luz en el vacío $c = 3 \cdot 10^8$ m/s

MAPA CONCEPTUAL DE LA OPTICA FISICA



6.4. VISIÓN DE LA FORMA Y EL COLOR



SUMARIO

1. Fisiología de la visión
2. El ojo como instrumento óptico
3. Defectos refractivos y su corrección
4. Física del color
5. Percepción del color



FISIOLOGÍA DE LA VISIÓN

El ojo humano es el instrumento que ha diseñado la evolución para registrar las imágenes significativas para nuestra forma de vida. Mientras que otros animales son capaces de ver las radiaciones infrarrojas y ultravioletas, nuestro ojo sólo detecta el corto abanico de radiaciones que va desde el color rojo al violeta, siendo ciego a todas las demás. A cambio, vemos muy bien en este intervalo de colores, percibimos el relieve gracias a nuestra visión binocular como cualquier animal depredador, y tenemos una visión nocturna muy aceptable.

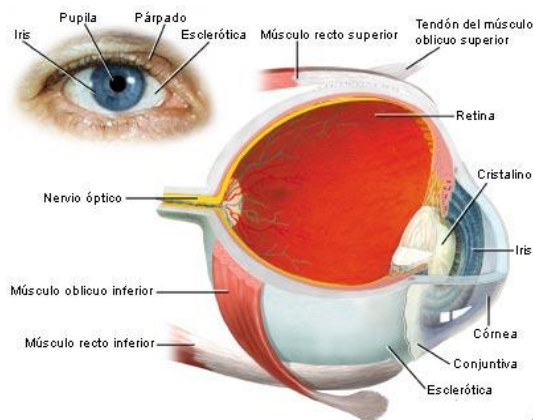


fig 4.2

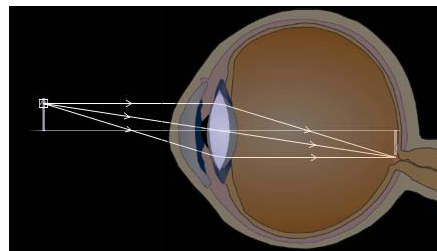


fig 4.3

Desde que llega la imagen al ojo, encuentra una serie de medios refractivos que ayudan a su enfoque final:

- La *córnea*, en la parte más externa, es un tejido transparente, donde los rayos de luz sufren la primera refracción fuerte.
- A continuación, la *pupila*, o *iris* es un diafragma variable que limita la cantidad de luz que lo atraviesa.
- El *cristalino*, es una lente convergente de potencia variable conectado a unos músculos que gradúan la tensión de los filamentos responsables de su convergencia. Gracias a ellos la imagen se puede focalizar en la retina independientemente de la posición del objeto.
- El *humor vítreo* es una gelatina traslúcida por la que viaja el rayo hasta el fondo del ojo. Es bastante frecuente que aparezca en él el fenómeno de las *moscas volantes* que son manchitas que vemos al mover la mirada frente a superficies iluminadas.
- Finalmente, la *retina* es un tejido plagado de células sensoras donde se forma una pequeña imagen invertida de los objetos. A ella llega la luz donde es absorbida en parte por unos pigmentos situados en la base de los conos que transforman la energía luminosa en un impulso nervioso que viaja pasando por las células bipolares y las ganglionares que forman una red horizontal que las conecta para enviar el primer impulso ya codificado hacia el cerebro.

EL OJO COMO INSTRUMENTO ÓPTICO

Entendido como instrumento óptico, el ojo es un aparato que modifica la imagen que se contempla, casi siempre con disfunciones. Cuando la visión se hace deficiente es conveniente corregirla con gafas o lentes de contacto. Otras técnicas más invasivas que tallan la córnea con un laser, están aún en período de comprobar su evolución a largo plazo.

Si el objeto se acerca, para mantenerla en retina hay que **acomodar** el cristalino a distancias pequeñas (incrementando de forma refleja la convergencia). Los niños acomodan fácilmente desde los seis metros hasta unos 8-10 cm. Se define como **punto próximo**, a la mínima distancia a la que se puede mantener una visión nítida sin fatiga. A partir de los 45 años el cristalino pierde flexibilidad, se va haciendo progresivamente rígido y el ojo no puede enfocar a distancias cortas.

En el gráfico adjunto, se observa que la formación de la imagen en la retina es análoga a la de una cámara fotográfica de una única lente en la que la lente convergente (objetivo) da imágenes invertidas y reales en la pantalla en la que está la película o el CCD. Si la distancia del objeto al ojo se reduce, la imagen se aleja de la retina y el ojo enfoca de nuevo aumentando cambiando el espesor del cristalino de forma refleja. El punto más alejado se llama punto remoto (PR) y el más inmediato punto próximo (PP). Los márgenes de este proceso llamado *acomodación* llegan hasta las 12 dioptrías en los niños. Con la edad, el cristalino se va haciendo más rígido y el punto próximo se va alejando y el remoto se acerca vez más hasta confundirse ambos

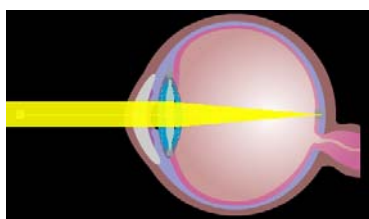


fig 4.4

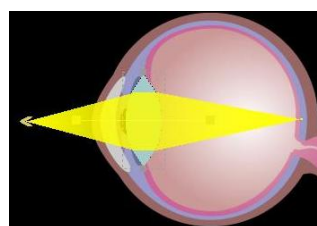


fig 4.5

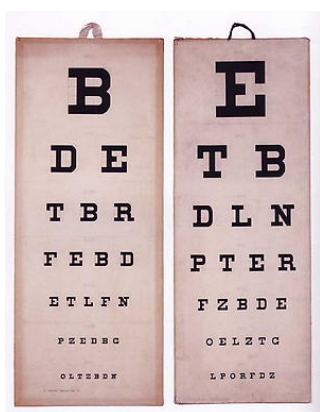


fig 4.6 Optotipo de letras

DEFECTOS REFRACTIVOS Y SU CORRECCIÓN

El ojo es un órgano que tiene disfunciones con mucha frecuencia, heredadas o adquiridas por el rápido cambio en las condiciones de trabajo. Las *ametropías* (del griego *amétrope*, sin medida) son aquellas anomalías que se pueden corregir usando gafas, lentes de contacto o cirugía. Para el diagnóstico de las ametropías se continúan utilizando los optotipos que son láminas cuya visión correcta indica visión normal. De no tenerla, se le van probando distintas lentes al paciente hasta conseguirla.

Miopía

Es un defecto que se va extendiendo como consecuencia de que trabajamos cada vez más a distancias cortas (lectura, pantallas, electrónica, etc,...). Se produce cuando el globo ocular es demasiado largo, o por defectos en cristalino o córnea, las imágenes de objetos lejanos focalizan antes de la retina y es imposible una visión clara de sus imágenes. Sin embargo, el miope ve muy los objetos próximos, lo que justifica que estas personas sean minuciosas y observadoras.

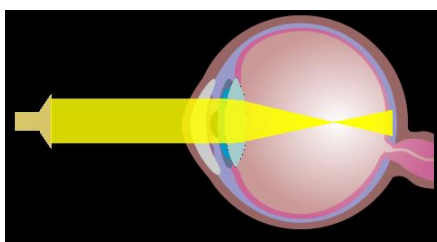


fig 4.7

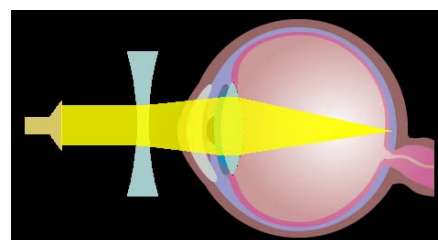


fig 4.8

El niño miope no diagnosticado, es Incapaz de seguir con fluidez las explicaciones de una pizarra, lo que le puede crear aislamiento con sus compañeros e incluso fracaso escolar. Es fácil detectarlo porque el afectado cierra mucho los ojos al mirar objetos lejanos y así consigue mayor profundidad de campo. Su diagnóstico comienza haciendo observar al sujeto *optotipos* para visión lejana. Las filas de caracteres (letras o círculos con una pequeña señal) disminuyen de tamaño hasta la máxima agudeza visual. Si el sujeto es miope, se le van probando distintas lentes divergentes que abren la trayectoria del rayo y consiguen que la imagen sea nítida hasta en los caracteres más pequeños. Otro test complementario es el dicromático que se basa en el hecho de que el miope ve mejor los colores rojos que los verdes (¿sabes por qué?)

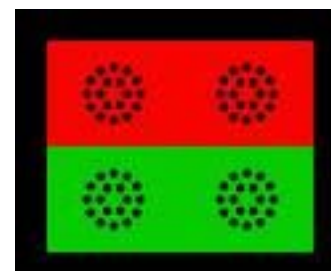


fig 4.9 Test rojo-verde

Hipermetrópia

Este defecto es contrario al anterior pero de diagnóstico y tratamiento más difícil. El individuo que la padece tiene el ojo más corto de lo normal, por lo que los rayos procedentes de objetos lejanos o próximos, enfocan *después* de la retina. A edades jóvenes tenemos un margen de acomodación bastante grande, y ello hace que acomodemos de modo reflejo sin darnos cuenta del defecto. Pero cuando el potencial de acomodación no es suficiente, la imagen deja de verse nítida y hay que corregir el defecto con lentes convergentes tanto para visión próxima como lejana.

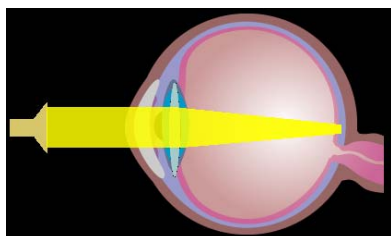


fig 4.10

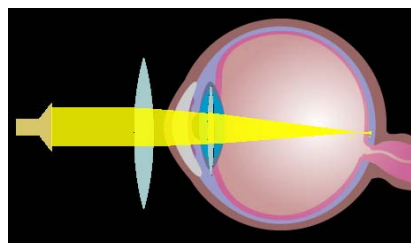


fig 4.11

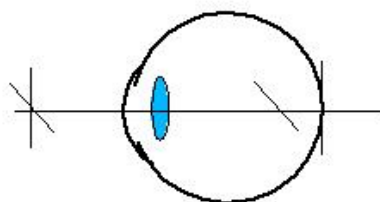
Para su corrección se usan los mismos optotipos. El hipermetrope ve mejor los colores verdes por un motivo análogo al miope.



fig 4.12 Test para astigmatas

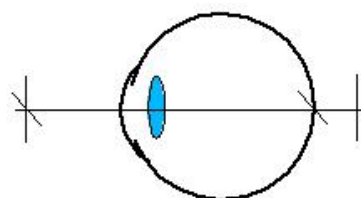
Astigmatismo

Aunque todos los padecemos en un grado leve, los casos acusados son hereditarios. Se manifiesta tanto en visión lejana como próxima porque el globo ocular tiene una curvatura diferente para cada meridiano y por tanto la focalización de los rayos que inciden paralelos en un determinado plano, ocurre en una posición distinta que en el perpendicular y ello da lugar a visión borrosa e incluso doble.



Astigmatismo miope

fig 4.13

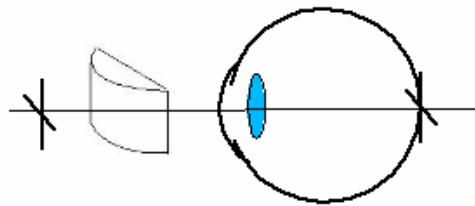


Astigmatismo hipermetrópico

fig 4.14

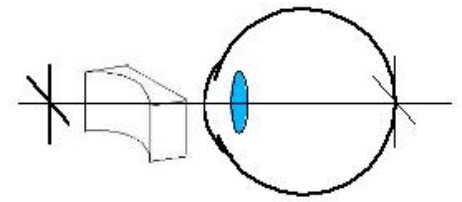
El paciente debe corregir el defecto tanto en visión lejana como próxima, en primer lugar con una lente convergente o divergente) que lleve uno de los focos a retina. A

continuación se le superpone una lente cilíndrica que sólo modifican la posición del foco que queda antes o después de la retina hasta hacerlo coincidir con el que ya está en ella. Cuando ambos coinciden, el defecto está corregido.



Astigmatismo hipermetrópico corregido con un cilindro

fig 4.15



Astigmatismo miópico corregido con un cilindro divergente

fig 4.16

Presbicia

A partir de los cuarenta o cuarenta y cinco años, la flexibilidad del cristalino disminuye sensiblemente para *todo* el mundo, y la acomodación se restringe progresivamente. El ojo normal presbita sólo necesita lentes convergentes para visión próxima con graduaciones pequeñas al principio, pero en el transcurso de los años, ésta graduación crecerá hasta las tres dioptrías. Si el sujeto tenía una ametropía previa a su graduación inicial habrá que añadir la *adición* causada por la hipermetropía. La adición es una incrustación sobre la lente normal para visión lejana de la persona. Aún se utilizan las antiestéticas gafas bifocales diseñadas para mirar a los objetos lejanos cuando se dirige la mirada por la parte superior de la lente, y para enfocar con nitidez hacia los objetos próximos cuando se mira a través de la adición, situada en el hemisferio inferior. Cada vez se implanta más el uso de las *lentes progresivas*, cuya curvatura va cambiando de modo continuo para que sea posible enfocar las distintas distancias cambiando la dirección de la mirada.



fig 4.17 Lente bifocal para presbitas, ya en desuso por antiestética

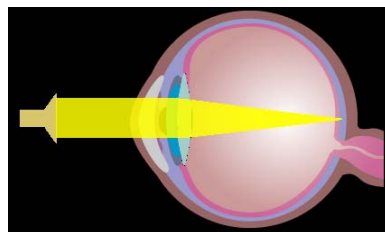


fig 4.18

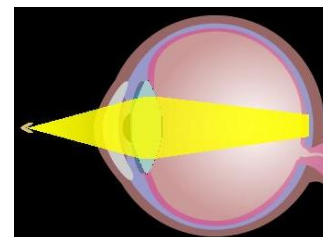


fig 4.19

Visión binocular

La problemas de la visión no son sólo refractivos. Cada ojo recibe dos imágenes invertidas levemente distintas que van al cerebro donde éste las refunde en una única, grande, directa y en relieve. Un ojo vago puede tener una buena refracción pero una visión deficiente porque no ha "aprendido" a ver: Los parches en el ojo de algunos niños intenta corregir el defecto cuando aún se puede reconducir.

Un ojo estrábico tiene un defecto de los músculos oculares que impiden que ambos ojos apunten al mismo lugar y el cerebro se defiende la doble visión eliminando una de las imágenes. Su solución al menos estética, es quirúrgica, aunque no siempre se consigue la recuperación binocular.

ejemplos resueltos

Ejemplo :

Calcular la amplitud de acomodación de un ojo joven que enfoca desde el infinito hasta su punto próximo a 8 cm

Solución:

Se define amplitud de acomodación como la variación de potencia del ojo para acomodar entre el punto próximo y el remoto

De la fórmula de las lentes $1/s' - 1/\text{inf.} = 0 - [1/-0,08] = +12,5 \text{ Dp}$

Este valor se reduce hasta prácticamente cero a los 75 años

Ejemplo:

El punto próximo de un presbita es de 75 cm. ¿Qué corrección hay que añadir para situarlo a 25 cm?

Solución:

Con la nueva lente, los rayos llegan al ojo con la misma inclinación que cuando viene del punto remoto a ojo desnudo. Por ello la nueva lente debe formar imagen virtual del PP' a 75 cm.

$1/-0,75 - 1/-0,25 = 1/f'$ implica $f' = 0,375 \text{ m}$ implica $1/f' = 2,67 \text{ Dp}$

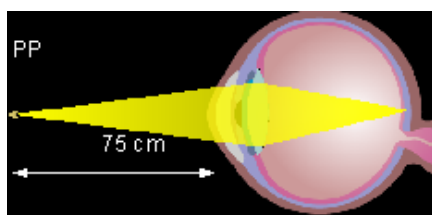


fig 4.20

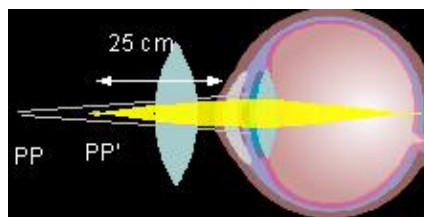


fig 4.21

Ejemplo

Un miope es incapaz de ver objetos más allá de 2,5 m. ¿Qué lente hay que colocarle para que pueda ver nítidas imágenes del infinito?

Solución:

Con la nueva lente, los rayos llegan al ojo del infinito lo hacen con la misma inclinación que cuando viene del punto remoto a ojo desnudo. Por ello la nueva lente debe formar imagen virtual del PP' a 75 cm. (llevando el infinito a esa distancia).

De la fórmula: $1/-0,25 - 1/4. = 1/f' \Rightarrow f' = -25 \text{ cm} \Rightarrow 1/f' = -4 \text{ Dp}$

(EL PR se debe situar en el foco imagen de la nueva lente)

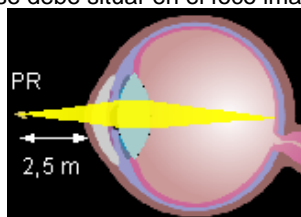


fig 4.22

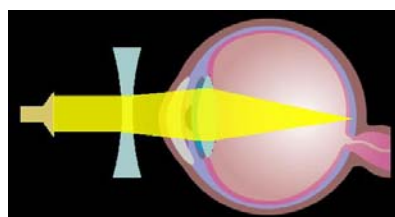


fig 4.23

NATURALEZA DEL COLOR

En 1665 Newton adquirió un prisma en la feria de Stourbridge una localidad a sólo dos kilómetros del Trinity College donde se vendían como artículos lúdicos e inicia sus investigaciones sobre la luz. Un año después adquiriría otros dos gracias a los cuales demostraría con su *Experimentum* la pureza de los colores espectrales que clasificó como rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, índigo y violeta. En su libro *Opticks* describe sus muy precisas experiencias, destila los principios de las mismas, y sugiere explicaciones a las causas que para él aún son un misterio. Su intuición por adivinar que estaba iniciando una nueva rama de la física (la Óptica Física) basada en la experimentación y los principios, le hizo detenerse especialmente en el análisis del color de los cuerpos, ya fueran emisores o reemisores de luz.

Fuentes de luz y color de los cuerpos

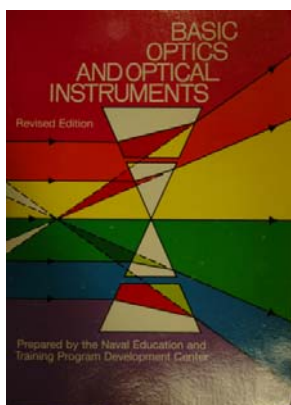


fig 4.24 Colores con luz blanca artificial

La teoría electromagnética explicaba la identidad de las ondas de luz y calor como ondas portadoras de energía, de características variables para cada radiación. Estas ondas electromagnéticas, se propagan como una pareja de vectores E y B variables en el tiempo y el espacio de forma periódica y pueden interactuar con la materia cediendo parte de esa energía dando lugar a distintos procesos. El color de los cuerpos sería el resultado de la emisión selectiva de ciertas longitudes de onda procedentes del objeto tras la estimulación de sus cargas exteriores por las radiaciones del foco de luz. Por ello el color de un cuerpo cambia según sus características propias y por el tipo de luz que le ilumina. Las imágenes adjuntas son el resultado de una iluminación diurna y otra con una lámpara de bajo consumo respectivamente.

Hay otras causas de color como las interferencias de las luces provenientes de las alas de las mariposas, la difracción de las corazas de algunos escarabajos o la fluorescencia de los billetes bancarios tras su iluminación con luz UV.

El modelo, que aún se utiliza para explicar un sinnúmero de fenómenos y aplicaciones en tanto sus interpretaciones y predicciones sean coherentes, era incapaz de explicar la extraña distribución de frecuencias luminosas que emite y absorbe un metal una cavidad practicada en un metal sometida a distintas temperaturas.

Para Bohr, los electrones pueden subir a niveles excitados cuando se les comunica energía durante tiempos del orden de 10^{-8} s. Tras ese tiempo, vuelven a los estados iniciales desprendiendo un corpúsculo llamado fotón al que se asocia una onda elemental. La energía de cada fotón vale:

$$E = h\nu$$

donde h es la conocida constante de Planck y ν es la frecuencia de la onda asociada, de longitud de onda λ . Este modelo explicaba las estrechas rayas de colores monocromáticos que se observan en los espectros de emisión discontinuos de los gases con una transición electrónica. Es un modelo más potente pero menos operativo por su dificultad.

Mezclas de color

Tras descubrir que la luz blanca está formada por un espectro de colores puros espectrales, Isaac Newton intentó explicar cómo se obtienen otros colores mezclando éstos apropiadamente. Para ello ideó cerrar el espectro lineal en un círculo que se iniciaba en el rojo y seguía por los amarillos y verdes,... hasta finalizar en la zona no espectral de los colores llamados *púrpura*.

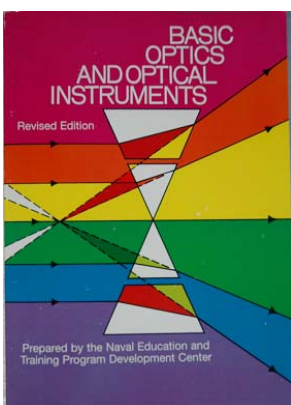


fig 4.25 Colores con luz ambiente natural

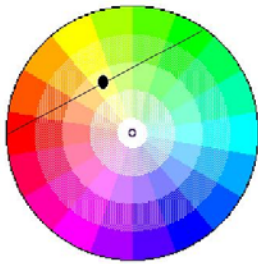


fig 4.26 La rueda de Newton

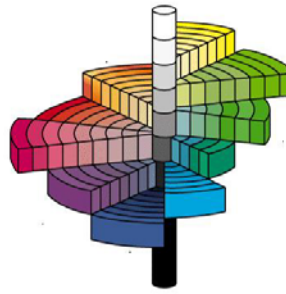


fig 4.27 Rueda de Munsell

Dado un punto de la periferia donde está cierto color saturado, se iban añadiendo blancos progresivamente en dirección radial hasta el centro, en donde se perdía totalmente el color hasta alcanzar un blanco puro. Con esta disposición era posible obtener un color cualquiera no espectral en el centro de gravedad del segmento obtenido uniendo en distintas proporciones los colores situados en los extremos de una misma línea.

Su rueda de color, con imprecisiones, fue el inicio del estudio científico de algo que ya venían haciendo los artistas. A partir de ese momento las sucesivas aportaciones de científicos, pintores y diseñadores gráficos, dieron lugar a los actuales diagramas Munsell o CIE que ahora utilizan de modo rutinario las casas de pintura, ayudadas con métodos informáticos, para reproducir cualquier color con mezclas convenientes.

En ambos se definen tres variables que permiten la identificación de un color concreto que la clasificación de Munsell visualiza de modo muy intuitivo. En él salen de un eje cilíndrico los distintos tonos con distinta proporción en blanco.

- El *tono o matiz* lo da la longitud de la onda. Si nos situamos en la periferia del círculo central, el cambio en las longitudes de onda da los distintos tonos *saturados*. Un color saturado es por tanto un *color espectral*.
- La *saturación* está relacionada con la proporción de color blanco que se añade a uno saturado según nos acercamos hacia el eje central. Aumenta del centro a la periferia de cualquier círculo.
- La *luminosidad*. Si se fija un color de cierto tono y saturación, se puede graduar a voluntad su intensidad luminosa o brillo desde un mínimo oscuro hasta un máximo brillante.

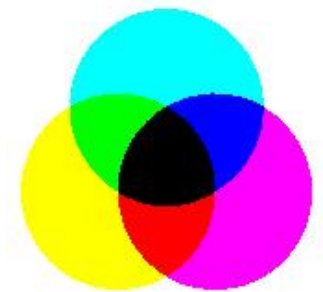


fig 4.28 Mezcla sustractiva

Mezclas aditivas y sustractivas

Cuando se proyectan los colores primarios (rojo, verde y azul) sobre una pantalla blanca, su efecto conjunto sobre nuestra retina puede reproducir cualquier color. Se dice entonces que se ha obtenido una *mezcla aditiva* que los artistas llaman *color luz*. La mezcla rojo-azul se llama *magenta* y la verde-azul se llama *cian*.

El hecho de que el color blanco, por ejemplo se pueda obtener sumando el rojo, verde y azul ha dado no pocos malentendidos entre científicos, para quienes la luz blanca tiene siete colores, y pintores para quienes solo tiene los tres citados.

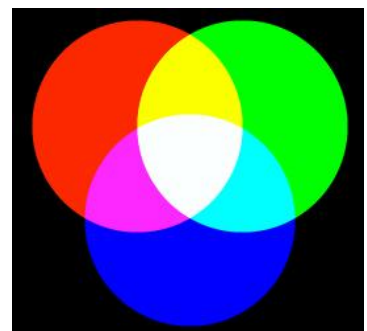


fig 4.29 Mezcla aditiva

Sin embargo, si se pone un pigmento rojo en un cuadro, la luz blanca que lo ilumina queda en parte absorbida y en parte reflejada. La luz reflejada que llega a nuestra vista es entonces el resultado de *restar* a la luz blanca los colores *verde y azul*. El resultado

es el mismo que cuando se interpone un filtro que absorba los colores azul y verde, dejando pasar sólo el rojo, y de ahí que se llame *sustractivo* a este proceso.

- Un color cian será por tanto el resultado de filtrar el rojo del haz blanco
- Un color magenta de filtrar el verde.
- Un color amarillo de filtrar el azul

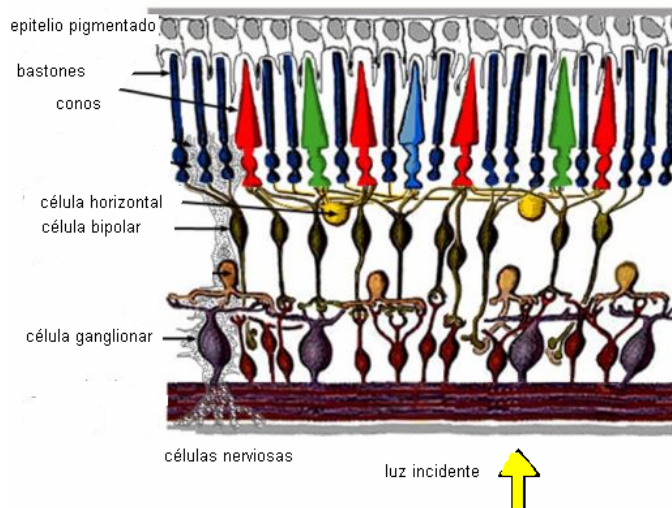


fig 4.30 Detalle de células en la retina

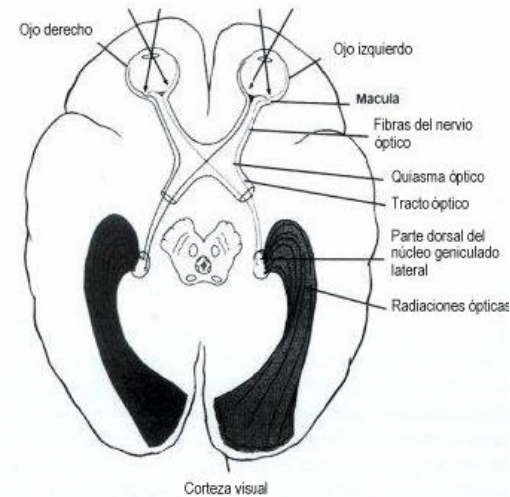


fig 4.31 Diagrama de la transmisión de la señal visual

Fisiología y percepción del color

Los hechos expuestos hacen pensar que sólo hay tres colores puros, pero el prisma detectaba al menos siete. ¿Sucede entonces que los otros cuatro no son puros? Newton no pudo entender el hecho de seamos incapaces de diferenciar el color amarillo resultado de la mezcla del rojo y el verde, con el amarillo del espectro obtenido en un prisma.

Cien años después, Thomas Young propuso que la clave estaría en la percepción fisiológica del fenómeno, argumentando que puesto que no podría haber una célula distinta para la infinidad de colores del espectro, las habría de tres clases, cada una de ellas muy sensible al color que determina su pigmento, y parcialmente a colores intermedios. Helmholtz y Maxwell perfeccionaron su teoría, y hace pocos años (1960) la identificación del pigmento *rodopsina* en las conos y bastones, ha comprobado lo correcto de su formulación inicial.

Vemos con el cerebro

En la retina hay infinidad de células: los conos, responsables de la visión diurna, la agudeza visual y el color, y los bastones, que nos proporcionan la visión nocturna. Ambas están interconectadas entre sí por neuronas, y traducen los pulsos de la luz a señales eléctricas que son recogidas en el nervio óptico, la gran neurona que prolonga el cerebro para percibir la realidad, y llevadas por un camino complejo hasta la *corteza visual*, la zona del cerebro en la que las dos pequeñas imágenes levemente distintas de cada ojo se funden en una sola, se perciben en relieve como imagen de tamaño real y directa. Lo que sucede en estas zonas está aún en investigación pero las modernas técnicas de MNR que detectan actividad en distintas zonas del cerebro según la función que éste realice (visión, memorización, etc) están proporcionando aportaciones fundamentales a la identificación de la geografía del cerebro y de sus funciones.

Los conos situados en las proximidades de la *fovea* son los responsables de la visión diurna del color, mientras que los bastones son células muy sensibles al movimiento y la intensidad luminosa, aunque no detectan el color, situados en la periferia .

Por un motivo de economía (*"lex natura"*) no hay tantos tipos de células como tonos, sino sólo tres, de modo que cada una responde fundamentalmente a los colores rojo, verde y azul y débilmente a los colores intermedios. Estas células están conectadas por redes de neuronas que envían el estímulo resultado al cerebro a través del nervio óptico .

Su funcionamiento es sencillo: si un rayo de color amarillo incide sobre la retina, se activan parcialmente los pigmentos rojo y verde con intensidad variable. Esta información de la distinta intensidad de cada estímulo, viaja al cerebro donde éste la decodifica como color verde.

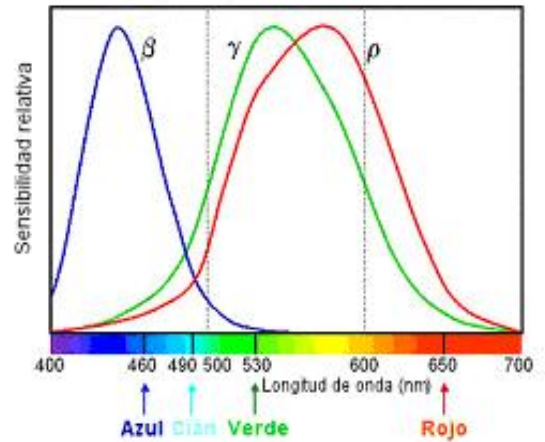


fig 4.32 Respuestas de los conos al color

Del mismo modo, si dos radiaciones simultáneas roja y verde llegan al ojo, los pigmentos rojo y verde se excitan del mismo modo y el cerebro identifica esta señal del mismo modo que si fuera un color monocromático.

En la figura adjunta se comprueba que tras visualizar durante breves segundos una figura con dos colores complementarios (amarillo y azul) se produce el agotamiento de ambos tipos de pigmentos en las células, por lo que al dirigir la mirada hacia un fondo blanco se ven los complementarios de éstos. En nuestro caso, una cruz azul sobre fondo amarillo

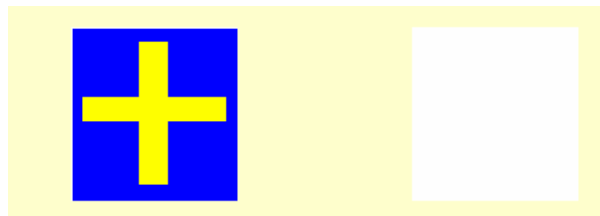


fig # 4.33 Evidencia de las postimágenes y presencia de pigmentos en los conos

Ejemplo:

Observa detenidamente la imagen adjunta hasta que observes dos imágenes distintas ¿Puedes explicarlo?



Para que el proceso de identificación de los objetos sea más rápido, la evolución nos ha preparado para almacenar modelos mentales, abstraídos de infinidad de observaciones previas, con los que confrontamos nuestras observaciones. Tras una rápida búsqueda comparada se decide por el que le resulta más fácil. En el caso del ejemplo que observa una joven o una anciana.

Ejemplo:

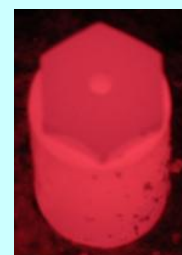
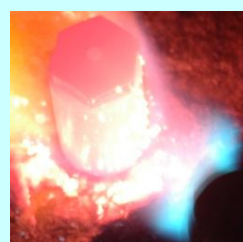
Un paciente al que le han recetado gafas para una miopía fuerte, se queja de que ve las imágenes muy pequeñas. ¿Está mal corregido?

En absoluto. La lente divergente aleja la imagen del interior de un ojo corto como el miope hasta la retina donde enfoca bien pero a costa de reducir su tamaño como hacen todas estas lentes.



El cuerpo negro

Para explicar el desacuerdo de las curvas de emisión de energía en relación con la frecuencia que daban la teoría electromagnética y los resultados experimentales, a fines del pasado siglo, el alemán Max Planck hizo una hipótesis revolucionaria, postulando que la energía que se emitida por la cavidad de un metal cuando se calentaba a temperaturas elevadas, se emitía en forma de *cuantos* individuales (de cuya realidad nunca estuvo muy convencido). Tanto su compatriota Albert Einstein como el físico danés, Niels Bohr, los utilizaron para crear la nueva teoría cuántica de la luz y la materia, aunque el primero tampoco se sintió a gusto con las últimas consecuencias de ésta, de tan paradójicas que le parecían. Según esta hipótesis, el mejor cuerpo negro es una cavidad porque absorbe toda la radiación que le llega y no devuelve ninguna. Análogamente, esta cavidad cuando emite energía propia lo hace con más intensidad que ningún otro cuerpo



En la figura hacemos la historia gráfica de ambos procesos reproducida en el laboratorio de nuestro centro mediante un cilindro de cobre al que le practicamos un agujero roscado, al que acoplamos un tornillo del mismo metal con un orificio pasante hasta el cilindro. En absorción, el pequeño agujero se ve más negro que las superficies en que se apoya, también negras. En emisión, tras calentar el metal al rojo con un soplete, el agujero emite la mayor intensidad de luz.

El color de los cuerpos

Si en la oscuridad no observamos el color de los cuerpos, y éste aparece en presencia de luz ambiente, sólo lo podremos explicar aceptando que ésta provoca interacciones en el cuerpo. Desde nuestro modelo, la onda incidente afecta a las cargas eléctricas de enlace de las moléculas, electrones libres de los metales, etc que entran a su vez en vibración con cierta analogía a la fuerza periódica que aplicamos para conseguir la oscilación de un columpio: si nuestra frecuencia del impulso coincide con la propia del columpio, la amplitud de la oscilación es máxima como sabemos.

El balance energético de la onda se reparte entre absorción (que puede ser reemitida o perdida en calor) y transmisión. El porcentaje de la misma que va a cada término depende de la frecuencia de la radiación incidente y la frecuencia propia de vibración de las cargas y es esto lo que condiciona que los materiales sean opacos o traslúcidos.

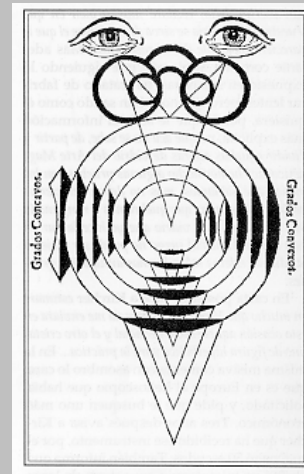
En un mecanismo muy complejo, cada onda provoca la emisión de onditas secundarias de igual frecuencia y amplitud variable que interfieren con ella dentro y fuera del medio provocando ondas reflejadas y/o transmitidas. Las que se propagan en los medios traslúcidos, en sus interferencias con la incidente, provocan nuevos frentes de onda que se propagan con distinta velocidad. El resultado es un color en la reflexión, y casi siempre el mismo en la transmisión refractada.

Matizado este modelo, puede explicar también que las láminas muy delgadas de oro se vean amarillas en

Contexto histórico



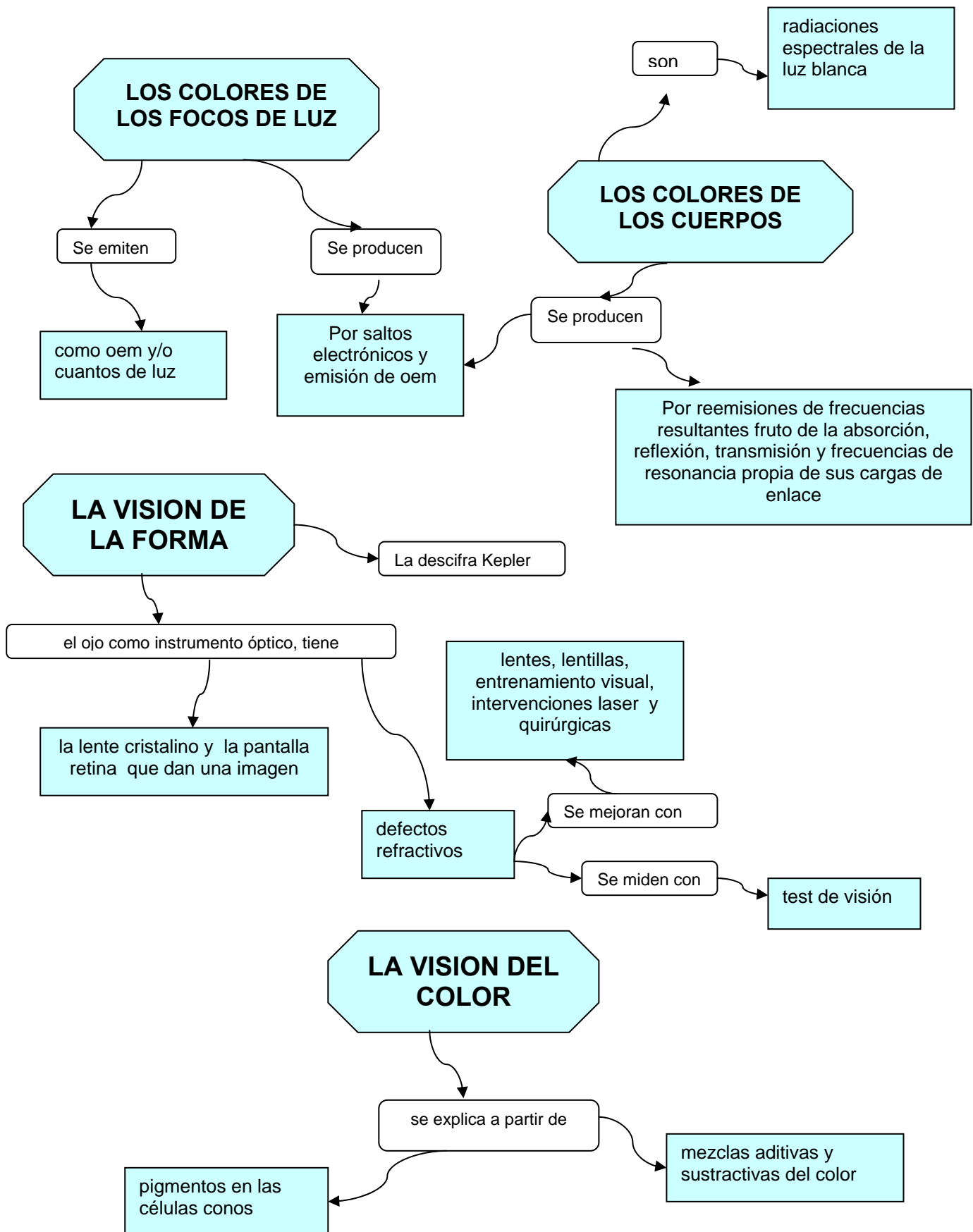
El fraile y funcionario cordobés de la Inquisición, Daza de Valdés, publica en el año 1623 el primer libro de óptica reconocido internacionalmente, donde clasifica las anomalías de la visión y prescribe su graduación en unas unidades que llamó *grados*. Diferencia ya entre lentes positivas para ver de cerca y negativas para los miopes.



No se entiende cómo una persona externa a los ambientes científicos pudo llegar a una comprensión tan clara de la refracción, sólo 13 años después de la utilización del telescopio por Galileo.

El CSIC (Consejo superior de investigaciones científicas) honra su figura poniendo su nombre a uno de sus centros, el Instituto de Óptica

MAPA CONCEPTUAL DE COLOR Y VISIÓN



ANEXO VII: SECUENCIA DE SESIONES

SECUENCIACION DE CONTENIDOS Y ACTIVIDADES (I)			
CLASE MAGISTRAL INTERACTIVA: (CMI) . EXPERIENCIA DE CATEDRA HISTÓRICA (EC) . EXPERIENCIAS ILUSTRATIVAS (EXP) . ACTIVIDAD DE ALUMNOS (AA) . SESION POWER POINT (PP) .RESOLUCION EJERCICIOS (RE) . HISTORIA DE LA C ^a (H^aC^a) .SIMULACIONES INFORMATICAS (SD) . PROBLEMAS PARA CASA (PC) . CIENCIA VIVA (CV) . .ACTIVIDADES VOLUNTARIAS (AV) .			
SESION	CONTENIDOS	ACTIVIDADES	RECURSOS
CAPÍTULO I: OPTICA GEOMÉTRICA			
1	Presentación del curso: programación y evaluación. Propuesta de trabajo histórico- epistemológico individual. Presentación de la UD. Los preconceptos.	Entrega de programa, normas de evaluación, colección de problemas y CD. Desarrollo de mapa conceptual inicial de la OG .Test de ideas previas.	Videoprojector, fomularios
2	Introducción : las teorías extromisiva e intromisiva. La cámara oscura. Convenio de signos	Presentación audiovisual con los precedentes griegos. (PP)+(H^aC^a) La cámara oscura: interpretación según la teoría de rayos (EXP) . El alfiler invertido: interpretación según la T ^a de rayos (EXP) .	Caja de puros con agujero estenopeico y espejo interno periscópico. Alfiler, hoja de papel con agujero estenopeico. Videoprojector.
3	Reflexión de la luz. Reflexiones especular y difusa. Espejos planos: imágenes en un solo espejo (campo de observación) Imágenes en espejos múltiples.	Exposición magistral (CMI) sencillos y múltiples .Gráficos en software (SD) . Diferenciar imágenes reales y virtuales (EXP) . Resolución ejercicios (RE) . Problemas para casa (PC)	Videoprojector. Espejos en bisagra. Puntero laser. Vidrio deslustrado. Software <i>Crocodile</i> . Lámina metálica (o papel metalizado) brillante flexible.
4	Los espejos esféricos cóncavos: fórmula de los espejos. Formación de imágenes.	Exposición magistral. Imágenes reales con espejos esféricos. (CMI) . Resolución gráfica por los alumnos de todos los casos (AA) .Trabajo para casa (PC) : ejercicios y física de cocina (pantalla con espejo plano y cóncavo)	Espejo de tocador. Vela. Pantalla blanca. Regla y compás.
5	Exposición de los trabajos históricos y pequeños proyectos voluntarios.		
6	Los espejos esféricos convexos: fórmulas y formación de imágenes	Exposición magistral con apoyo experimental . (CMI) .Simulación con software (SD) . Resolución gráfica y analítica por los alumnos de todos los casos (AA) . Problemas para casa (PC)	Espejo de tocador y vela. Software <i>Crocodile</i> y <i>Raytrace</i>
7	La refracción: Ley de Snell Densidades ópticas. Ángulo límite. Refracción y reflexión en lámina paralela traslúcida. El arcoiris	Experiencia de Cátedra de deducción de la Ley de Snell en cubeta de vidrio (EC) . Visualización de la refracción en matraz esférico con agua con lasers de dos colores. (EXP) Relación de la desviación de un rayo incidente en una lámina gruesa con el ángulo de inclinación. Propuesta de ejercicios y experiencia de cocina con puntero laser para casa (PC) .	Cubeta estrecha de vidrio. Laser rojo (de diodo y gas) y laser verde de diodo. Matraz esférico con agua teñida para simular gota de agua.
8	La Ley de Snell	Resolución de ejercicios de láminas (RE) . Comentario a la geometría de Snell y Descartes de su Ley a la vista del texto original (H^aC^a) .	Texto de Descartes <i>Les Méteores</i> en soporte digital. Videoprojector.

SECUENCIACION DE CONTENIDOS Y ACTIVIDADES (II)			
9	El prisma. Ángulo de desviación mínima	Exposición magistral con ayuda de prismas (CMI) y software interactivo (SD) .	Prismas, Software <i>Crocodile</i>
10	El Dioptrio esférico. Las lentes delgadas: clasificación y descripción cualitativa	Exposición magistral apoyada en ejemplo de etiqueta de botella mediada de agua.(CMI)	Botella con agua.
11	Fórmula de las lentes delgadas. Fórmula de Newton.	Exposición magistral apoyada en visionado de lentes (CMI) . Resolución de ejercicios (RE) .	Lupas comerciales y gafas de miope.
12	Formación de imágenes en lentes convergentes Aumento de una lupa	Exposición magistral en pizarra (CMI) seguida de software de simulación (SD) . Ejercicios con compás y regla (AA) . Propuesta de ejercicios para el día siguiente	Software Crocodile
13	Formación de imágenes en lentes divergentes	Resolución de ejercicios pendientes por los alumnos (RE) Clase magistral nueva materia (CMI) Propuesta de ejercicios para el día siguiente (PC) .	Calculadoras, regla y compás.
14	Lentes combinadas	Informe en Power Point sobre los telescopios refractores y su incidencia en la Revolución Científica (PP)+(H³C³) . Propuesta de construcción de telescopio astronómico con lupa de relojero y lente de présbita. Propuesta de ejercicios para casa (PC) .	Observación en telescopios artesanales
15	Instrumentos Ópticos: cámara de fotos, telescopios, microscopio. Aberraciones. Los límites de la Óptica de Rayos.	Clase magistral con apoyo en lentes y banco óptico (CMI) . Simulaciones en software científico (SD) .	Programa <i>Crocodile</i> .
16	Control escrito de ejercicios y cuestiones		
17	Recapitulación y sumario. Propuesta de actividad avanzada voluntaria nº 1 : estudio de la lupa (AV)		
CAPÍTULO II: ONDAS MECÁNICAS			
18	Repaso ley de Hooke. MAS en muelles. Velocidad y aceleración. Fase inicial..	Sesión magistral con apoyo experimental de muelles de distinta rigidez (CMI) Resolución de ejemplo numérico (RE)	Muelles, pesas y portapesas.
19	Resolución de ejercicios numéricos de MAS	(RE)	Calculadora

SECUENCIACION DE CONTENIDOS Y ACTIVIDADES (III)			
20	Ecuación de ondas transversales a derecha e izquierda. Interferencias constructivas y destructivas de ondas senoidales.	Explicación magistral (CMI) interferencias en agua con cubeta de ondas y software de simulaciones (SD) .	Cubeta de ondas. Fotografías. Software Crocodile.
21	Hipérbolas de máximos y mínimos	Resolución de ejercicios de ecuación de ondas (RE). Interferencias: Condición de máximos y mínimos	
22	Ondas estacionarias. Condición de nodos y vientres. Armónicos	Exposición magistral. Obtención de nodos y vientres con muelles (CMI). Ondas y osciloscopio (EXP).	Muelles largos de distinta rigidez. Osciloscopio y altavoz o micrófono.
23	Ondas de sonido y su velocidad. Potencia e Intensidad .Umbral sonoro en decibelios. Contaminación acústica.	Cálculo de la velocidad del sonido . Clase magistral (CMI). Medida de decibelios ambientales con sonómetro (EXP).	Probeta grande con agua, diapasón .Sonómetro
24	Resolución de ejercicios de sonido		
25	Contexto histórico de los "beats". Interferencias de ondas de sonido	Exposición magistral con una breve biografía de Young (H^aC^a). Recapitulación (CMI) Producción de Interferencias sonoras con diapasones y software informático (SD) .	Diapasones y software <i>Data Studio</i>
Control escrito			
CAPÍTULO III: OPTICA FÍSICA			
26	El primer Experimentum: el espectro <i>oblongo</i> .	Experiencia histórica de Cátedra. (EC) Discusión del procedimiento. Discusión de los modelos de Newton, Hooke y Huygens (H^aC^a).	Dos prismas, videoprojector, pantallas y rendija.
27	Ondas y corpúsculos de luz .	Power Point sobre Descartes , Newton y Huygens (PP) + (H^aC^a) Obtención por el gran grupo de la ley de Snell sobre una tabla de ángulos (AA).	Videoprojector ,cubeta estrecha graduada en ángulos, puntero laser.
28	Introducción a las ondas de luz.	Relato de los antecedentes de Newton y Young. Interferencias en mareas y sonidos (CMI) + (H^aC^a). Interferencias en láminas delgadas (CMI).	Videoprojector, software Raytrace
29	Dispersión de la luz en prismas: relación del ángulo con la longitud de la onda.	Exposición magistral.(CMI).Resolución de ejercicios (RE).	
30	Principio de Fermat. Angulos de incidencia, reflexión y refracción. Incidencia en ángulo límite.	Sesión magistral inicial.(CMI) Simulación de gota con matraz esférico (SD) y Laser. Visualización de rayos refractado y reflejado en pecera estrecha (EXP) .	Video proyector Simulación de refracciones y reflexiones con software

SECUENCIACION DE CONTENIDOS Y ACTIVIDADES (IV)			
31	Interferencias de luz y coherencia. Interferencias en películas de espesor variable. Los fits de Newton	Los anillos de Newton en vidrios portaobjetos con luz natural y monocromática (EC)	Vidrios portaobjetos, lámpara de sodio, lámpara blanca fluorescente.
32	Interferencias luminosas	Conseguir interferencias con un cabello (EC). Sesión de resolución de problemas numéricos (RE).	Vela de parafina. Bastidor con cabello y rendija montados en dos diapositivas.
33	El Principio de Huygens-Fresnel y el principio de Fermat	Exposición teórica apoyada con cubeta de ondas y pizarra magnética (CMI). Obtención de interferencias constructivas o destructivas tras rendija estrecha y ancha con dos papeles recortados representando ondas transversales (AA). Obtención de ángulo de reflexión y refracción por el trayecto de tiempo mínimo entre dos puntos con la misma construcción (CMI).	Cubeta de ondas. Papel y tijeras. Pizarra Vileda magnética.
34	Difracción de la luz en rendija sencilla y doble. Poder separador de un instrumento.	Obtención de las expresiones matemáticas sin cálculo integral (CMI) Visualización y discusión sobre la importancia histórica de la doble rendija. (H ^a C ^a)	Puntero Laser rojo. Rendijas simple y doble. Redes de difracción.
35	Obtención de difracciones luminosas. Las placas zonales	El Experimentum Crucis de Arago (La mancha de Poisson). Su trascendencia(EC). Escenificación de actividad histórica (H ^a C ^a).	Laser de helio- neon , bola de rodamiento y pantalla.
36	Polarización de la luz. Ley de Malus, ángulo de Brewster.	Exposición magistral.(CMI) Experimentum con espejos cruzados. (EC) Ejemplo numérico (RE).	Vela, dos varas soporte, dos vidrios con una base negra.
37	Inicio a las ondas electromagnéticas. Relaciones entre ondas polarizadas y e.m.	Discusión histórica sobre polarización.(CMI) Discusión histórica sobre los antecedentes de Maxwell y sus ecuaciones . Resultados de Maxwell (H ^a C ^a).	
38	Ondas Hertzianas.	Experiencia de Cátedra: El Experimentum Crucis de Hertz. Detección de oem emitidas por un carrete Rhumford . Experiencia de Cátedra: Oscilador LC de alta frecuencia (EC). Montaje de una radio galena (EXP).	Material de Electricidad II antiguo de ENOSA. Kit comercial de radio galena.
39		Control escrito: problemas y cuestiones. Propuesta de actividad avanzada voluntaria nº 2 para casa: el principio de Fermat (AA).	

SECUENCIACION DE CONTENIDOS Y ACTIVIDADES (V)			
CAPÍTULO IV: VISION DE LA FORMA Y EL COLOR			
39	Fisiología del ojo .El ojo como instrumento óptico. Defectos refractivos y su corrección con lentes y optotipos.	Exposición magistral.(CMI) Detección de miopes con optotipo y su corrección con regleta de lentes. Prueba del agujero estenoico (EXP). Simulaciones con software (SD).	Optotipos comerciales. Software <i>Crocodile</i> .
40	Visión binocular. El color de los cuerpos. Tono, brillo y saturación de un color. Mezclas de colores. Teorías de la visión	Exposición magistral (CMI). Proyección de test de postimágenes y visión de mezclas de colores (EXP) . . Relación con la teoría intromisiva de Alhazen (H^aC^a).	Caja mezclas aditivas. Caja mezclas sustractivas. Test de postimágenes. Test de Daltonismo.
41	Daza de Valdés	Biografía y obra contextualizada (H^aC^a)	Imágenes de su texto extraídas de Internet.
41	Ejercicios numéricos acerca de amplitud de acomodación y corrección de ametropías con lentes (RE).		
42	Sesión de presentaciones audiovisuales de informes individuales		
43	Control global de la Unidad		

ANEXO VIII

LAS PRESENTACIONES MULTIMEDIA

LAS PREGUNTAS ANTIGUAS

- ¿Qué es la luz?
- ¿Cómo vemos los objetos?
- ¿Cómo se propaga la luz?
- ¿Qué combustible hay en los astros eternos?

1

ANTES DE LOS GRIEGOS



- El culto al sol
- El uso de espejos en Egipto.
- El uso de lentes en China y Babilonia

2

LOS GRIEGOS I

- Cepédocles, Ptolemy y Arquimedes proponen una teoría sobre la naturaleza de la luz.
- El semirrejo describe a la semirrejo.



3

LOS GRIEGOS II



- Épicles y Demócrito proponen la "teoría" que explica el objeto como plano de superficie.
- Luciano el poeta latino, recupera la teoría siglos después.

4

EL ESPLENDOR ARABE

- Alhazen (984-1039) describe la luz y la visión en su obra "Optica".
- Los persas utilizan el espejo.
- El espejo plano y el espejo esférico.
- Alhazen, el primero en explicar la reflexión de la luz.



5

LA EDAD MEDIA

- Constantino, Bacon y Ptolemy, Willelmo y Teodoro de Friburgo recuperan la tradición árabe y griega.



6

LA CONTRIBUCIÓN DE LOS PINTORES DEL QUATROCENTO



- El arte de plasmar la perspectiva estudia el rigor en el estudio de la imagen.



7

LEONARDO DA VINCI ESTUDIA EL OJO Y LA VISIÓN

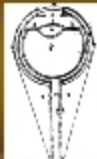
- En su tratado, describe la estructura del ojo y la visión.
- Habla de una pirámide visual que conecta los objetos.
- El cristalino invierte doblemente la imagen.



8

LA ANATOMÍA OCULAR

- Wilhelm Müller (1535-1614) atribuye a la retina la función de pantalla. El cristalino solo transmite la función refractiva.



9

LA NUEVA ÓPTICA

- Giovanni Battista (1535-1615) da la importancia a las propiedades de las lentes y mejora la cámara oscura con una lente.



10



Joannes Kepler (1571-1630)

- Sus estudios sobre la cámara oscura, los eclipses y las lentes, convergen, le abocan a ser el primero de la historia que explica la imagen invertida en la retina.
- Construye su propio telescopio (mejor que el de su amigo Galileo).



11

LA CONFIRMACIÓN DE LA EXPERIENCIA

- Christoph Scheiner (1575-1630) diseña una cámara oscura y observa la imagen invertida en la retina.
- Raimundus Lullius (1509-1560), repite y dibuja la experiencia.



12

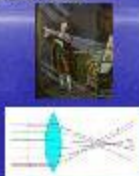
LA TEORÍA DE LOS MEDIOS

COLOR, INTERFERENCIAS Y
DIFRACCIÓN

1

El padre de la Óptica Física

- Sir Isaac Newton (1642-1727) hizo sus experimentos de Óptica con tres prismas, compuestos en uno solo.
- Investigó sobre el color y le dio cuando intentó eliminar las aberraciones cromáticas de los telescopios.



2

EL PRIMER EXPERIMENTUM CRUCIS DE LA FÍSICA

- Los colores, que descomponen al prisma se ven en el rojo de las bandes.



3

- Si el segundo prisma no modifica el color, validación o el primero, si grafica que el único efecto al el prisma es dividir las colores, no cambiarlos.
- ¿Qué es la luz para Newton?



4

LA PRUEBA DEL ARCO IRIS

- Newton explica al arco iris, primero y al segundo a partir de la ley de Snell y del cálculo diferencial (que usa durante su primer trabajo).
- No puede con el supernumerario.



5

LA NUEVA FÍSICA NECESITA LAS NUEVAS MATEMÁTICAS

- Aplicando al cálculo diferencial, encuentra la derivada, necesario para la resolución del arco iris.



6

EL SEGUNDO EXPERIMENTUM

- Para los griegos, los colores de la luz blanca, del agua, del aceite, del vidrio, del agua, plumas de paloma, etc. indicaban la existencia de la luz blanca.



7

ANILLOS DE NEWTON Y PERIODICIDADES

- El anillo con la luz blanca al conjunto, formado por una serie plana-concava y un vidrio plano-aplanado en observación del normal, solo se veían series de anillos multi-colores.
- Si se la luz roja, aparecen series de anillos rojos y oscuros.



8

FRANJAS EN OÑAS DE AIRE

- En la línea de la luz blanca, se veían series de franjas de colores, las rayas de la luz blanca se veían muy oscuras.
- Con luz blanca se observaban franjas de colores.
- Se consiguen por reflexión y por transmisión de la luz incidente.



9

2º "Fit" y corpúsculos?

- A la búsqueda de un modelo coherente.
- A la mejor, el corpúsculo, más el éter y más en el vacío, donde los corpúsculos que chocan se separan su parte.
- A la mejor, el corpúsculo, más el éter, como que se separan o se separan al segundo medio.



10

Christiaan Huygens (1629-1695)

- Expone al mundo como que la luz es un fenómeno de materia, no más lógico que las partículas a través del foco, comunican su movimiento a un ser en el presente.



11

EL PRESTIGIO DE NEWTON BLOQUEO LOS AVANCES DE LA ÓPTICA DURANTE UN SIGLO

- Incluso los genios se equivocan...

12

LA ECLOSIÓN ONDULATORIA

- Interferencia, Difracción y Polarización de la luz en un mismo modelo



1

El ataque de los heterodoxos



- El matemático Euler (1707-1803) enseña en 1782 a una princesa alemana que los fenómenos ópticos se explican mejor por ondulaciones del éter que con unos átomos corpúsculos.
- A falta de comprobaciones experimentales, sus teorías no tienen eco

2

Thomas Young 1773-1829

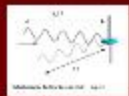
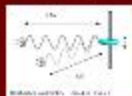


- El joven médico hace un trabajo sobre sonido y luz.
- Tras sus experiencias con sonidos y observa ondas de ondas en el agua, diseña la experiencia más hermosa de la Física, LA Onda LE RENDEZA.
- Es la base de la Mecánica Cuántica.
- La luz podría ser un onda longitudinal...



3

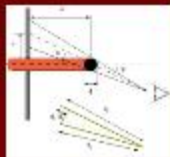
La clave está en las interferencias de las ondas cuando su dirección es idéntica (o casi) y son coherentes



4

Young calcula la longitud de onda de la luz visible

- Modifica a las fis de Newton.
- Con la doble rendija
- Observando interferencias provocadas por los dos lados de un cablejo



5

Las interferencias de Young explican el arco iris supernumerario



6

Augustin Fresnel (1788-1827)



- Ingeniero de Caminos, su rebelión contra Napoleón le impide encontrar trabajo y se dedica a investigar tópicos de Óptica.
- Tiene un gran dominio del Cálculo infinitesimal al que aplica a sus trabajos ópticos.



7

LA AYUDA DE ARAGO

- Durante su purga política en 1815 vive en París a Arago, antiguo compañero, científico y político prestigioso, que le informa de los avances de la Óptica europea (Young, Braggton...) pero aún no sabe inglés ni latín...
- Fresnel regresa a Normandía con sus investigaciones, donde un hermano le había los apuntes.



8

La coherencia

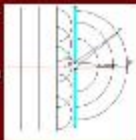
- Las frentes de onda luminosas tienen una pequeña longitud de coherencia (unos 3 cm).
- Hay interferencia (o difracción) sólo si coinciden en el mismo punto



9

El Principio de Huygens-Fresnel

- Los puntos de las frentes de onda, periódicas, son fuentes de infinitas ondas secundarias, que interfiriendo explican cualquier perturbación de foco.
- Si la rendija es estrecha se dice que el haz se DIFRACTA.



10

Los espejos de Fresnel

- Sus espejos demuestran mejor que la doble rendija las interferencias luminosas



11

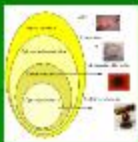
La mancha de Poisson

- Su contemporáneo, el matemático Poisson, tras analizar el modelo matemático de Fresnel, dice que si la luz fuera una onda, la sombra de un disco tendría una mancha de luz en el centro...
- Arago hace la experiencia con él y Poisson se hace ondulacionista.
- Fresnel piensa en dos átomos: uno físico que propaga las ondas longitudinales y otro eléctrico para las transversales...



12

LA SINTESIS ELECTROMAGNETICA



1

POLARIZACION

- Huygens analiza el fenómeno en el Capítulo de la lente.
- Descubre un rayo ordinario, otro extraordinario y un rayo principal.
- Alonso Heavon, lo interpreta así.



2

Polarización en espejos

- Méjico descubre que la luz solar reflejada en una superficie, se convierte al observarla a través de un cristal de calcita.
- Los cristales cruzados extinguen la luz.



3

Polarización Cromática

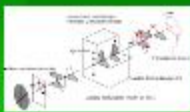


- Las experiencias con luz polarizada de Arago, Ampère y Fresnel, inducen a esta y a Young a proponer que las ondas de luz son transversales, y las transporta un éter sutil y elástico.

4

Polarización en cristales

- Si la luz incide en dirección privilegiada, el rayo ordinario y extraordinario viajan en la misma dirección a distinta velocidad...



5

Faraday y sus líneas de fuerza

- Describe las fuerzas a distancia como perturbaciones mecánicas transmitidas en un éter inextensible.
- Una línea, para él real, es un camino por el que se transmite la acción EM. Si el medio condensa y transmite la fuerza, descubrimos la existencia de una acción a distancia.



6

Interacciones magnetismo-luz

- Un imán intenso, cambia el plano de polarización de una luz.
- Queda la luz tinge aspectos EM...



7

Maxwell llega al bebé de Faraday

- Reivindica la existencia real de las líneas de fuerza EM y del éter de Faraday.
- Calcula la velocidad de la nueva perturbación a partir de:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$



8

LAS ECUACIONES DIGNAS DE UN DIOS

- Maxwell predice en 1873 las constantes de desplazamiento y la existencia de un nuevo tipo de ondas, las electromagnéticas.
- Resuelve al EM en cuatro ecuaciones:



$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

9

La gran síntesis de Maxwell

- La coincidencia de C con la nueva velocidad, permite la integración de la Física de la Nueva Física.



10

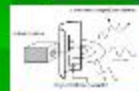
HERTZ CREA LAS NUEVAS ONDAS

- El profesor del Karlsruher Polytechnic Heinrich Hertz (1857-1894) diseñó entre 1886 y 1888 varias experiencias para comprobar la realidad de las ondas de Maxwell.
- Un cable de Ruhmkorff lleva la carga oscilante a dos esféricas metálicas próximas y crea un campo eléctrico variable.



11

Las O.E.M. son como las bombas



12

ANEXO IX
ARTÍCULO EN LA REVISTA ESPAÑOLA
DE FÍSICA, VOL. 21 N° 3, 2007

EXPERIMENTUM CRUCIS DE ÓPTICA FÍSICA EN LA
ENSEÑANZA SECUNDARIA

Experimentum Crucis de Óptica Física en la Enseñanza Secundaria

Francisco Sotres Díaz y Antonio Moreno González

In this paper we defend the use, at a high school level, of the Experimentum Crucis in Physical Optics as a didactic resource that can help in the understanding of the basic principles of this field. We also support that an historical perspective of the social context and of the new paradigms that these experiments brought with them, contributes to perceive the science as a cultural phenomenon born from the necessities and the leisure of the society that creates it. In order to exemplify the viability of this proposal we describe a collection of these experiments realized in a high school laboratory, with the help of the original old texts, and, some of them, with an original set-up.

Introducción

Tras la larga experiencia acumulada, por algunos, en la enseñanza de la Física en los últimos niveles de la Secundaria Obligatoria y el Bachillerato, venimos enfrentándonos a una disyuntiva no deseada, ni prevista años ha, por el profesorado pero que ahí está y además de forma ineludible: la apasionante tarea de desentrañar los rudimentos de una ciencia esencial para la vida de la humanidad, como es la Física, y el compromiso de preparar a los estudiantes para enfrentarse a unas pruebas de Selectividad de cuya nota puede depender su futuro profesional. Ceder totalmente de forma miope a la segunda alternativa limitándonos al papel de preparadores cual si de una academia se tratase, es algo contra lo que algunos venimos oponiéndonos no por satisfacer nuestras preferencias, sino porque estaríamos cerrando a futuros profesionales y ciudadanos la perspectiva cultural y formativa que esta materia confiere tanto desde la perspectiva científica como humanística. Consciente de la crisis de nuestros estudios, el anterior presidente de la Real Sociedad, Gerardo Delgado, propuso en repetidas ocasiones durante su gestión un mayor recurso a los aspectos experimentales en los estadios iniciales de su enseñanza, mientras que otras voces siguen reclamando además, un mayor énfasis en los aspectos históricos y sociales, argumentando que no sólo hay que enseñar Ciencia, sino también a enseñar sobre la Ciencia a través de su historia (Carreras y Yuste, 1995; Hodson, 1985; Martín, 1992; Matthews, 1994; Moreno, 1993).

De otro lado, los legisladores de las sucesivas reformas LOGSE y LOCE muestran también de modo recurrente su conformidad con estos extremos cuando recomiendan escenarios, metodología, inclusión de situaciones específicas de especial trascendencia y el conocimiento del perfil científico de los protagonistas de la Física¹.

En un intento de cuadrar este círculo, en el IES Gregorio Marañón de Madrid llevamos varios cursos potenciando tanto la dimensión histórica como la experimental de la Física, con unos resultados que no desdican de los del resto del distrito y, en ocasiones, con una mejor actitud y familiaridad de los alumnos con el fenómeno científico. Ciñéndonos a la Óptica Física, estamos llevando a cabo desde el pasado curso un plan de trabajo

centrado en la reproducción de sus *Experimentum Crucis* con material de fácil adquisición y con un soporte en CD de historias de las ideas científicas y de sus protagonistas, cuya evaluación aún no hemos finalizado formalmente, pero a la vista de los primeros sondeos se puede adelantar que los conceptos científicos clave como interferencia, difracción y polarización, salen reforzados, así como se evidencia una mayor familiaridad de los alumnos con el fenómeno científico.

Aunque sólo sea como simple apunte, en relación con la formación del profesorado, los aspectos históricos, filosóficos y sociales de la ciencia, están prácticamente ignorados tanto en la formación inicial como en la permanente. Incluso en la investigación didáctica son muy escasas las que tengan como objetivo la incorporación de aquellos aspectos básicos de la génesis y evolución de las ciencias.

Respecto a la acuñación histórica del término *Experimentum Crucis*, del que nos vamos a ocupar en este trabajo, su autor es Francis Bacon (1561-1626), el ideólogo de la metodología científica de los nuevos tiempos, que publica su texto *Novum Organum* como respuesta al *Organum* de Aristóteles. En él introduce el término *Instantia Crucis* (Caso Crucial) como la situación en la que se plantea una decisión entre dos opciones aparentemente igual de válidas, y el *Experimentum Crucis* como la experiencia que arbitra la disyuntiva definitiva. No hizo aportaciones importantes, incluso fue víctima de su impericia experimental (murió de una pulmonía cuando intentaba describir “historias científicas” –observaciones secuenciales de un proceso- a bajas temperaturas) pero propuso una metodología, en la que la relevancia del experimento controlado fundó escuela. A partir de esta expresión, los ingleses Robert Boyle, Robert Hooke e Isaac Newton, la utilizaron como el eje central de cualquier investigación científica.

Aplicada a la enseñanza, una revisión superficial de las experiencias cruciales clásicas es una magnífica vía de acercamiento a los aspectos fenomenológicos y epistemológicos sobre los que se sustentan las ideas científicas de cada época.

El Experimentum Crucis más conocido

Poggio Bracciolini (1380-1459), que era el típico hombre del Renacimiento, experto en leyes e investigador de manuscritos antiguos, indagó en su tiempo libre mientras estaba en Suiza

¹ LOGSE RD 1178/1992, 2 de octubre de 1992. LOCE RD 938/2001, 3 de agosto 2001.

como secretario apostólico de la curia romana en el concilio de Constanza, en las bibliotecas de los monasterios suizos, franceses y alemanes. En uno de ellos, el de Murbach, situado en Alsacia, encontró la obra del poeta latino Lucrecio *De Rerum Natura* (Lucretius, s. I A.C.), que recogía la tradición atomista de los filósofos griegos Epicuro y Demócrito. Cuando la lee el sacerdote y astrónomo francés Pierre Gassendi (1592-1665), primer espectador del tránsito de Mercurio predicho por Kepler, se convierte en el paladín europeo de la estructura atómica de la materia y la luz. Sus divulgaciones posteriores hicieron que Descartes, Boyle y Newton entre otros, optaran por este modelo. El rigor de pensamiento de éste último expresado en la frase "*Hypotheses non fingo*" cuando diferencia entre hipótesis y propiedades, no le impide en sus *Queries* (Newton, 1729) suscribir el atomismo para sus corpúsculos luminosos.

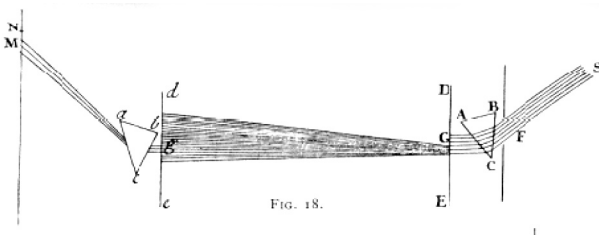


Figura 1. El Experimentum Crucis de Newton del que deduce que la luz blanca, a diferencia de las monocromáticas, no es pura. Euler lo contestaría más tarde.

La imposibilidad de perfeccionar los telescopios refractores debido a las aberraciones cromáticas, impulsó al joven profesor de Cambridge a construir su telescopio reflector, lo que le abrió las puertas de la comunidad científica europea. A partir de ese momento su interés por la Óptica Geométrica se desvanece a favor del estudio de la naturaleza del color y de su tratamiento matemático. Adquiere dos prismas en una feria de su condado, y en una de sus muchas experiencias (fig. 1) hace el conocido montaje: un estrecho haz de luz solar procedente de un agujero practicado en una persiana que incide sobre un primer prisma, produce un espectro visible continuo sobre una pantalla en la que hay una delgada rendija que permite seleccionar un único color. El nuevo haz se hace pasar por otro prisma y se observa que su único efecto es desviar el rayo sin modificar su color, contra la afirmación de Descartes de que la luz blanca, pura para él, se modifica en colores como consecuencia de los impactos de los corpúsculos contra el vidrio y los subsiguientes giros de éstos. La nueva tesis abrió las puertas de la Óptica Física: la luz blanca no era pura sino formada por los siete colores del arcoiris.

El montaje de la experiencia para nuestros alumnos, lo hacemos tras una corta introducción histórica con un audiovisual y con simulaciones realizadas por programas de software² que dibujan el ángulo límite y el de mínima desviación, que Newton utilizó en sus diseños iniciales. La puesta en práctica necesita el siguiente material (fig. 2)

- Un retroproyector
- Dos cartulinas que seleccionan en éste un haz de luz blanca

- Dos varillas soporte con plataforma sobre las que se colocan sendos prismas.
- Una rendija estrecha que selecciona el color rojo del primer espectro.
- Una pantalla



Figura 2. El Experimentum con prismas en nuestro centro.

Los anillos de Newton

La explicación de los colores mudables con el ángulo de observación en las láminas de mica, películas jabonosas, o el cuello de las palomas (fig. 3), junto a las conclusiones del *Experimentum Crucis* que propuso Newton, provocaron uno de los debates más largos de la Ciencia entre el consagrado (y huraño) Robert Hooke y el recién llegado a la comunidad científica, Isaac Newton.



Figura 3. Colores virtuales en el cuello de las palomas para Aristóteles, reales para Newton.

Los ejemplos citados tenían en común el implicar a láminas delgadas de espesor variable que reflejaban distintos colores al ser iluminadas con luz blanca de una incidencia próxima a la normal. Mientras que Hooke los explicaba desde un modelo casi ondulatorio, como originados por un retraso en los frentes reflejados en la primera y segunda superficie de la lámina delgada, Newton los achacó inicialmente a la reflexión en la lámina de unos corpúsculos, distintos según su color, seleccionados por el espesor de la delgada película. Los corpúsculos eran poseedores de unos estados periódicos de fácil o difícil acceso que llamó *fits*, que en ocasiones explicaba como fruto de su interacción con el éter o en otras, como propiedades intrínsecas al corpúsculo. Cada color se asignaba a corpúsculos de masa y velocidad distintas que tenían distancias específicas entre sus *fits* (fig.4). Inexplicablemente, solo la segunda superficie de la lámina era responsable para él de la aparición de los colores. Un rayo que llegaba según un *fit* de fácil acceso la atravesaba, y si lo hacía con el otro acceso (difícil), rebotaría en ella.

² Crocodile Physics, Raytrace

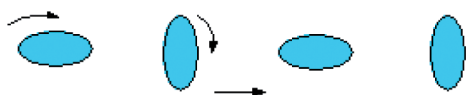


Figura 4. Una versión simplificada de los fits.

A fin de ilustrar su tesis y de tomar medidas precisas de la distancia entre estos accesos, diseñó el montaje adjunto en el que una lente plano-convexa, descansaba sobre un vidrio plano, con lo que conseguía controlar el espesor de la lámina de aire que atravesaba cada rayo de luz. Haciendo incidir luz blanca casi perpendicular a la lente, se observaron los conocidos anillos concéntricos policromados y oscuros (fig.5). Una propiedad geométrica le permitía relacionar el radio de cada anillo con el espesor de la película de aire, o sea con la distancia entre los fits. Con luz monocromática los anillos se veían más nítidos y a distancias mayores. La ausencia de luz en los anillos oscuros observados en la reflexión, la explicaba como la prueba irrefutable, un nuevo *Experimentum*, de que la luz que faltaba había atravesado la lámina de vidrio debido a que sus rayos estaban en fits de fácil acceso.



Figura 5. Anillos de Newton en el museo de la Universidad de Innsbruck.

El software referido, que simula rayos y medios refractivos permite ver con un videoproector las trayectorias de los rayos incidente, reflejado y refractado para interpretar el pensamiento de Newton a este respecto (fig. 6).

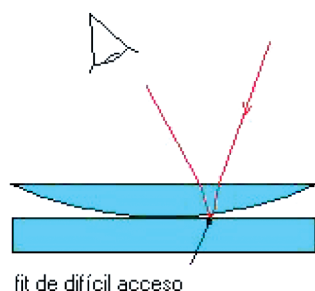


Figura 6. Modelo de Newton de los fits para los anillos.

Thomas Young recogió casi cien años después las minuciosas medidas de los fits de Newton en un conocido artículo (Young, 1802a) y las interpretó como la consecuencia de la interferencia de los dos rayos coherentes procedentes de la reflexión en las interfases de la lámina de aire comprendida entre la lente y el vidrio inferior, con una separación entre ambos lo suficientemente pequeña como para que al atravesar la pupila (3-5 mm) el cristalino los enfoque en la retina. La nueva teoría ondulatoria de la luz, atribuía a la diferencia de caminos entre los rayos reflejados en la primera y segunda cara de la lámina de aire (ambos coherentes) la razón de que sus interferencias fueran constructivas (anillos luminosos) o destructivas (anillos oscuros). El mismo software permite representar de modo interactivo la explicación de Young (fig. 7)

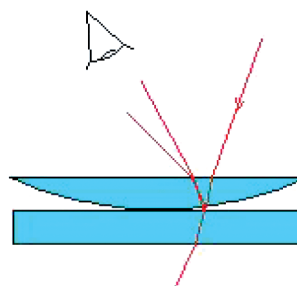


Figura 7. Modelo interferencial de los anillos para Young.

Con las muy precisas medidas indirectas de los espesores de aire entre la lente y la lámina para los que aparecen los anillos, función del diámetro de los mismos, Newton decidió identificarlos con la distancia entre dos fits distintos.

Conocedor de la pericia del maestro, Young recogió estos datos pero afirmó que la distancia entre fits distintos sería la mitad de una de sus longitudes de onda. Si tomamos el valor de 0,0000266 pulgadas para la longitud de onda de la luz roja que aparece en su citado artículo (fig. 8) un cálculo sencillo da 675 nm, valor muy próximo a los 650 nm de los actuales laser de luz roja. Aún hoy nos asombra la precisión de las medidas.

Colours.	Length of an Undulation in parts of an Inch, in Air.	Number of Undulations in an Inch.	Number of Undulations in a Second.
Extreme -	.0000266	37640	463 millions of millions
Red -	.0000256	39180	482
Intermediate -	.0000246	40720	501
Orange -	.0000240	41610	512
Intermediate -	.0000235	42510	523
Yellow -	.0000227	44000	542
Intermediate -	.0000219	45600	561 (= 2** nearly)
Green -	.0000211	47460	584
Intermediate -	.0000203	49320	607
Blue -	.0000196	51110	629
Intermediate -	.0000189	52916	652
Indigo -	.0000185	54070	665
Intermediate -	.0000181	55240	680
Violet -	.0000174	57490	707
Extreme -	.0000167	59750	735

Figura 8. Espacio entre fits versus longitud de onda.

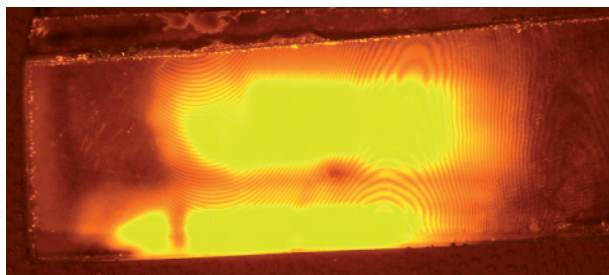


Figura 9. Interferencias con luz de sodio reflejada en láminas paralelas.

A falta de una lente plano-convexa que nos permita observar los anillos, el fenómeno de estas interferencias es fácilmente observable en un laboratorio escolar mediante dos vidrios portaobjetos de microscopio atados por un extremo por una goma y levemente separados por el otro con una lámina de papel, sobre los que hacemos incidir casi normalmente la luz de una lámpara de sodio (fig. 9). Tanto en la luz reflejada como la transmitida a su través, se observan máximos brillantes y mínimos oscuros de interferencia cuya uniformidad depende de lo regular de la superficie del vidrio que se utilice (los portaobjetos de microscopio dan resultados satisfactorios). Nótese que la separación angular de la parejas de rayos reflejados crece según aumenta el ángulo de incidencia, lo que unido al progresivo solapamiento de los máximos y mínimos de las distintas longitudes de onda dificulta cada vez más su observación. De ahí la necesidad de la incidencia casi normal y la ventaja de utilizar luz monocromática.

Como colofón a la experiencia pensamos conveniente dedicar un tiempo a comentar que mientras que los *Principia* han resistido el paso del tiempo, *Opticks*, con una metodología experimental e inductiva, quedó en el olvido desde la confirmación de la teoría ondulatoria un siglo después, hasta que autores recientes (Cohen, Whitaker, 1971) han visto en la teoría de los *fits* cierto paralelismo con la acepción de la dualidad onda corpúsculo: Si bien es cierto que Newton no admitía la naturaleza ondulatoria de la luz, en su intento de explicar la periodicidad de los colores en los anillos buscó otra propiedad complementaria a sus corpúsculos. Nunca relacionó los fenómenos de difracción de la luz conocidos desde Grimaldi con las ondas, aunque les dedica un capítulo de su *Opticks*. Tampoco Huygens lo hizo, en contra de un malentendido frecuente.

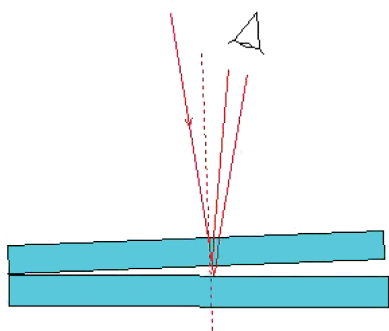


Figura 10. Interferencias de Newton en cuñas de aire entre láminas de vidrio paralelas.

Difracción de Young con un cabello

Menos conocida que la experiencia de la doble rendija, pero igualmente espectacular, fue la de colocar un cabello humano (no valía el de un caballo por su mayor grosor) en el camino de la luz de una vela lejana y observar a ojo desnudo la figura de interferencia de los rayos procedentes de ambos bordes del cabello. Su descripción original en otro artículo de las *Philosophical Transactions* del mismo año (Young, 1802b), describe el fenómeno sin diagramas de modo muy sobrio, lo que dificulta entender su concepción de las interferencias.

Se me ocurrió que podría buscarse su causa en la interferencia de dos porciones de luz, una reflejada desde la fibra y otra desviada a su alrededor en su sitio opuesto ...El ancho de la apertura era de 66/1000 (de una pulgada), y su distancia al cabello de 8/10 de una pulgada; el diámetro del cabello era de 1/600 de una pulgada. Por tanto tenemos 11/1000 para la desviación de la primera franja roja a la distancia de 8/10; y como $8/10 \cdot 11/1000 = 1/600 \cdot 11/48888$, o $1/43636$ (de una pulgada) para la diferencia de caminos de la luz roja donde era más intensa.

La experiencia nos pareció lo suficientemente atractiva como para reproducirla en nuestro centro con materiales sencillos: sobre un listón de madera con dos ranuras transversales colocamos dos marcos de diapositiva. Un cartón en el primero con una delgada rendija hace de diafragma, y un cabello en el segundo de elemento difractor. Si se coloca en un ambiente de penumbra la llama de una vela a una distancia de unos cinco metros, se ve una mancha brillante central alternada de al menos cuatro espectros continuos sucesivos separados por bandas oscuras tal como indicamos en la figura adjunta (fig. 11).

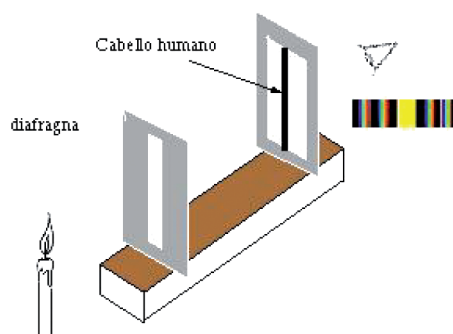


Figura 11. Difracción de luz de una vela con un cabello.

Debido a la precisión de las medidas necesarias para la obtención de resultados fiables, preferimos centrar la actividad en la observación cualitativa del fenómeno y aprovechar los datos numéricos de Young.

Aunque por esa época Young aún no conocía el mecanismo de la difracción, ya atribuía la aparición de colores a las interferencias entre dos rayos coherentes. De los datos del artículo seleccionado, proponemos una explicación similar a la de los textos de Bachiller y primeros cursos universitarios (fig. 12), con la diferencia de que al ser el ojo el que hace de pantalla, el ángulo de desviación de los máximos y mínimos hay que medirlo por su posición virtual en el primer marco, dada por la prolongación de la visual correspondiente.

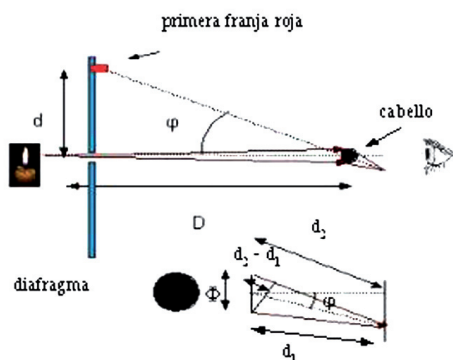


Figura 12. Distancias y ángulos considerados en las medidas de la difracción de la luz en el cabello.

Fijada por ejemplo la atención en el primer espectro observado y en un color como el rojo, la medida de su posición virtual d en el cartón de la primera diapositiva, la distancia D del cabello a dicho marco y el grosor, Φ del cabello permiten estimar su longitud de onda. Admitiendo que el primer máximo rojo se debe a la diferencia de camino de los rayos que sufren inflexión en los bordes del cabello e interfieren en el ojo, es trivial el correspondiente cálculo:

Como para ángulos pequeños el seno y la tangente se confunden, para el primer máximo podemos escribir:

$$\operatorname{tg} \varphi = d/D \approx \operatorname{sen} \varphi \Rightarrow d_2 - d_1 = \lambda = \Phi \operatorname{sen} \varphi$$

Pasando al Sistema Internacional los cálculos de Young se obtienen 582 nm, para la luz roja, un valor menos preciso que el obtenido a partir de los anillos. Es ilustrativo identificar el cabello con una doble rendija a la que se le hubieran quitado los dos tabiques laterales.

Un año más tarde, Young comprueba en su *Screening Experiment* que el bloqueo de la luz incidente por uno de los bordes de un obstáculo, hacía desaparecer las franjas de difracción interna que aparecen en su sombra. Esto, junto a la explicación ondulatoria del arcoiris supernumerario, fue un nuevo aldabonazo a su teoría ondulatoria a pesar de las crueles críticas de más de un contemporáneo para quienes Newton ya había cerrado suficientemente el tema con sus corpúsculos y *fits*.

Aunque hoy es frecuente observar la interferencia de los rayos difractados de una luz láser monocromática a ambos lados del cabello en una pantalla, con la nitidez suficiente para ser observadas por un gran grupo, la versión clásica es aún más sorprendente por la aparición de los colores que provoca la interposición de un cabello en el camino de la luz blanca de un modo tan sencillo.

La derrota final de los fits

El ingeniero civil francés, Augustin Fresnel (1788-1827), deportado a su ciudad natal de Normandía, Mathieu, por Napoleón tras su alistamiento en contra, aprovechó su exilio para convertir en vocación lo que hasta entonces sólo había sido un hobby: la Óptica. Su desconocimiento del inglés, le obligó a repetir de nuevo, y superar, los pasos de Young. Hemos reproducido por su interés parte del texto original en donde rebate

de modo contundente la teoría de los *fits* del respetado Newton (Fresnel, 1819):

...Para convencerse, basta con colocar un prisma sobre una lente cuya superficie inferior ha sido ennegrecida, de forma que el ojo no reciba más luz sensible que la que es reflejada por las dos superficies de la lámina de aire entre los dos vidrios. Si se les dispone de forma que el prisma sobrepase al vidrio, y que el punto de contacto se encuentre hacia la extremidad de éste, se podrá entonces comparar los anillos oscuros con la parte de la base del prisma que excede a la superficie, que no envía al ojo más que el producto de una sola reflexión: ahora bien, se verá, sirviéndose de luz homogénea, que esta parte del prisma está mucho más iluminada que los anillos oscuros, que no pueden por ello volver a ser considerados como resultante sólo de la supresión de la luz inferior, sino de una disminución considerable de la reflexión superior; particularmente en los puntos más sombríos del primero y segundo anillos, donde toda reflexión parece apagada, cuando los vidrios están bien pulidos y la luz incidente lo suficientemente simplificada. Es evidente que si eso no ocurre para los otros anillos, que se deba a un defecto de la luz homogénea. Pero si no se llega a producir un negro completo, se puede, fácilmente, incluso hasta el sexto orden, hacerles lo suficientemente oscuros como para poner en evidencia el debilitamiento de la reflexión superior. Este fenómeno me parece difícil de explicar por la teoría de Newton...

El texto continúa criticando las contradicciones de que la distancia entre *fits* cambie con la inclinación del rayo y el silencio respecto a lo qué sucede en sus estados intermedios...

La experiencia del prisma es concluyente y demuestra que, en contra de lo que afirmaba Newton, la base del prisma también contribuye al reflejo (fig. 13), de donde se deduce que los anillos oscuros visibles en la zona interior se deben a la acción conjunta de los rayos reflejados a ambos extremos de la lámina de aire comprendida entre el prisma y la lente, mientras que los procedentes de rayos que sólo se reflejan en cara interior del prisma, dan una zona uniforme. Curiosamente, el genial Fresnel no relata el mayor brillo de los anillos luminosos de la zona interior respecto a la iluminación homogénea externa cuyo origen está en la redistribución de la energía que no va a los mínimos oscuros y a la contribución simultánea de dos rayos.

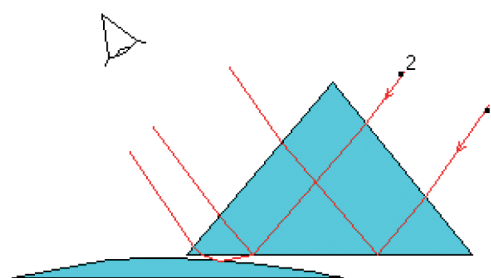


Figura 13. Derrota del modelo de los fits.

Al carecer en nuestro laboratorio de la lente plano convexa de gran distancia focal, la sustituimos por un portaobjetos con la cara inferior pintada de negro a fin de eliminar la reflexión en ella, con lo que en lugar de anillos obtuvimos franjas oscuras y brillantes paralelas como era de esperar (fig. 14). El resultado es igual de espectacular e ilustrativo para la comprensión del fenómeno.

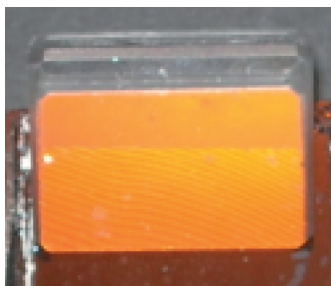


Figura 14. Interferencias en lámina de aire entre prisma y porta-objetos.

Nótese, si se intenta su reproducción, que al enfocar el ojo las bandas paralelas, éstas parecen venir del infinito, a mucha distancia del prisma que sólo se encuentra a una pequeña distancia del objetivo, de ahí lo difícil de obtener fotografías bien enfocadas que ilustren el fenómeno con nitidez.

El software que hemos comentado, es de nuevo de una gran ayuda didáctica por la agilidad con la que se pueden ensayar distintos ángulos y posiciones de incidencia (fig 15)

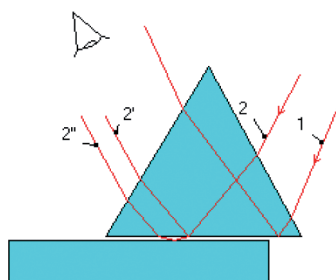


Figura 15. La base del prisma también refleja luz.

La mancha de Poisson

A la vista de las propuestas ondulatorias de Fresnel para la luz, el excelente matemático Poisson encontró en ellas una aparente contradicción, pues de los cálculos se deducía la aparición de un punto brillante en la sombra de un pequeño disco producida por una fuente puntual, cosa aparentemente absurda. El amigo, protector y colaborador de Fresnel, François Arago, recogió el reto y al poco tiempo comprobó la aparición de dicho punto en la sombra de un disco circular de 2mm de diámetro. Lo espectacular de esta demostración explicada por la difracción de la luz de un foco puntual incidente en los bordes del disco, supuso la adscripción incondicional de Poisson al nuevo modelo.

A partir de otras similares vistas en Internet, hemos montado con éxito esta experiencia (fig. 16), con el siguiente material:

- Un láser de He-Ne
- Una bola de rodamiento de 2 mm de radio pegada sobre un alambre, situada a 1,5m de la lente
- Una lente de distancia focal +50 mm que proporciona un foco puntual para iluminar el rodamiento.
- Una pantalla situada a 4 m de la bolita.

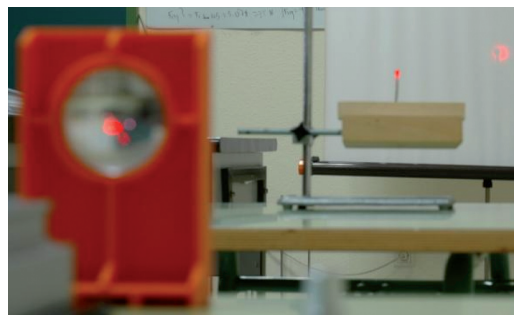


Figura 16. Montaje para obtener la mancha de Poisson.

El impacto y la sorpresa que esta experiencia consigue en el alumnado es notable. Uno de ellos interpretaba la aparición de la mancha central (fig. 17) diciendo que el rayo... ¡atravesaba la bola de acero!. Nótese además la presencia de franjas de difracción externas e internas a la supuestamente nítida sombra geométrica.

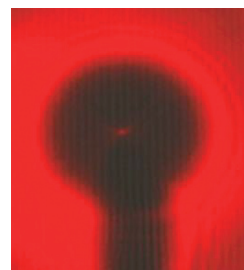


Figura 17. Detalle de nuestra mancha.

El ángulo de Brewster

Tras reconocer Huygens su desconocimiento de la naturaleza de la luz polarizada, Newton propone que la interacción de la luz con el espato de Islandia, responsable de su alteración, podría deberse a la posibilidad de que cada corpúsculo tuviera polos semejantes a los magnéticos (de ahí el término) sobre los que la materia haría fuerzas a distancia. El francés Etienne Louis Malus (1775-1812) a su vuelta como soldado de las campañas de Napoleón en Egipto, descubrió en 1809 que esta propiedad aparecía también en las luces reflejadas en vidrio, esmaltes, etc. y que cuando la incidencia entre el aire y el vidrio corriente, era de unos 57° (ángulo de Brewster para este material), el rayo salía totalmente polarizado en un plano como se comprueba al analizarlo a través de un cristal de espato. En una experiencia clásica, este efecto analizador se consigue también con un segundo vidrio dispuesto de modo que su normal se sitúe perpendicular a la del primero. Cuando la luz reflejada en el primer vidrio llega al segundo con el mismo ángulo de incidencia, se observaba que la luz se extinguía (fig.18).

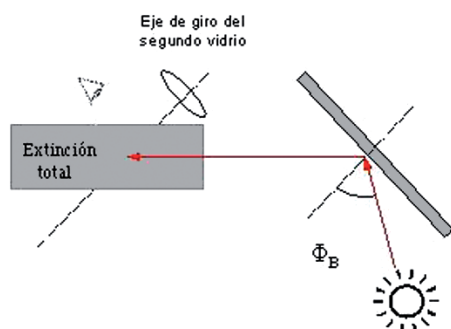


Figura 18. Esquema de la extinción con espejos cruzados.

Aunque se ponían en evidencia las propiedades transversales al sentido del recorrido, Malus siguió proponiendo la existencia de polos en los corpúsculos de Newton para explicarlo.

Hemos reproducido un antiguo montaje (Mach, 1926) mediante dos cuñas de madera pintadas de negro a las que se pegan sendos vidrios (fig. 19), con lo que es posible comprobar una gran disminución (daría extinción con vidrios totalmente isótropos) de la intensidad del haz inicial.

Es conveniente recordar aquí a los alumnos que las interferencias con luz polarizada permitieron inferir poco después a Young y Fresnel (1817) que las ondas de luz, perturbaciones del éter para ellos, deberían ser transversales. Maxwell y Hertz, que también creían en el éter, confirmarían medio siglo después con argumentos teóricos y experimentales, el carácter transversal de las ondas electromagnéticas de las que la luz era un caso particular.

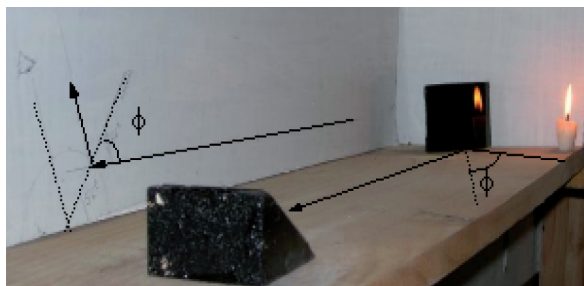


Figura 19. Observación de la extinción de Brewster.

Conclusiones

Los *Experimentum Crucis* precedentes, nos llevaron cinco intensos días lectivos, lo que no supone una gran merma en el tiempo de las clases convencionales. Realizados en gran grupo, tras una corta iniciación en Power Point, sazonados con diálogos interactivos, y seguidos de pequeños cuestionarios, permiten la motivación de toda la clase, y si el profesor hace el esfuerzo de contextualizar las experiencias, destacando también la relatividad del experimento como prueba definitiva de un paradigma y la dimensión social de la Ciencia así como el largo camino recorrido desde los corpúsculos de Newton hasta la difracción de Fresnel, el alumno crítico habrá ampliado su concepción sobre la Ciencia en un grado más consistente que el que obtuvo nuestra generación de bachilleres.

Ello no soluciona los problemas de fondo en el aprendizaje de nuestra materia, como son la escasez de horas lectivas, la deficiente base en cálculo de los alumnos, la actual tendencia a la trivialización del conocimiento y la creciente devaluación social de los estudios científicos, pero la mayoría de nuestros alumnos, mañana ciudadanos, ve en nuestra materia algo más que las expresiones matemáticas, imprescindibles cuando hay que profundizar más allá de la comprensión cualitativa del fenómeno, pero que a menudo la ocultan al alumno medio y desvían la atención de su dimensión cultural.

Referencias

- [1] CARRERAS, C. Y YUSTE, M.: 1995, *La luz a través de la Historia: CEMAV* (UNED), Madrid.
- [2] COHEN, B. AND WHITAKER, E.: 1971, *Opticks* (prólogo). Isaac Newton, Dover Publications, New York.
- [3] FRESNEL, A.: 1819, "Mémoire sur la diffraction de la lumière". Recueil de l'Académie des Sciences, Tome V, p. 347. Paris. Disponible en <http://www.gallica.bnf.fr>
- [4] HODSON, D.: 1994, "Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio". Enseñanza de las Ciencias, Barcelona, v. 12, n. 3, p. 299-313.
- [5] LUCRECIUS S. I AC.: *De Rerum Natura*, Traducido al español en Ed. Cátedra. Madrid, 1983.
- [6] MACH, E.: 1926, *The principles of physical optics*. Dover Publications, New York.
- [7] MARTÍN, M., MARTÍN, M^a T. Y M., RIBEIRO, C.: 1992, "Faraday y la electroquímica" / Actas XII/_ / Encuentros de Didáctica de Ciencias Experimentales/ E. U. de Magisterio de Oviedo, pp. 129-136.
- [8] MATTHEWS, R.: 1994, *Science teaching: the role of history and philosophy of science*. Routledge, New York.
- [9] MORENO, A.: 1993, "Light stories: a brief storie of light" Proceedings of the International Conference on Physics Education: Light and Information. Universidades do Minho. Braga
- [10] NEWTON, I.: 1729, *Opticks*, 4^a ed. Recopilado en 1971 por Dover Publications, New York.
- [11] YOUNG, T.: 1802a, "On the theory of light and colours (a Bakerian lecture)", Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. 92, pp 12-48. Disponible en <http://www.gallica.bnf.fr>
- [12] YOUNG, T.: 1802b, "An account of some cases of the production of colours not hitherto described", Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. 92, pp 387-397. Disponible en <http://links.jstor.org>

Francisco Sotres Díaz

profesor de Física y Química de Enseñanza Secundaria en el IES Gregorio Marañón de Madrid

Antonio Moreno González

profesor en el Departamento de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Facultad de Educación de la Universidad Complutense de Madrid